

POLITECNICO DI TORINO
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DEL CINEMA
E DEI MEZZI DI COMUNICAZIONE

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

e-ZAMPOGNÈ

Analisi delle zampogne italiane e sviluppo di uno strumento
musicale elettronico che ne recupera le caratteristiche



CANDIDATO: MASSARELLI CARLO

RELATORI: DE MARTIN JUAN CARLOS, SERVETTI ANTONIO

CO-RELATORE: VALLE ANDREA

TORINO, DICEMBRE 2009

*Ai miei amici, alla mia famiglia e alla
musica, che non mi hanno mai abbandonato.*

Ringraziamenti

I miei più sentiti ringraziamenti vanno: ai relatori, in primis, Professori Juan Carlos De Martin e Antonio Servetti per avermi seguito e sostenuto durante tutto il periodo di redazione della presente tesi e particolarmente al Prof. Andrea Valle, co-relatore di questa tesi, per avermi efficacemente guidato nello sviluppo del progetto, mettendo a disposizione il suo tempo e la sua grande esperienza in materia; al Prof. Febo Guizzi, per le numerose fonti messe a disposizione e per i chiarimenti forniti in merito alla storia, all'evoluzione e all'organologia degli strumenti a sacco.

Particolari ringraziamenti vanno ai vari costruttori e suonatori di strumenti musicali, che hanno messo a disposizione il loro tempo, la loro pazienza e, in alcuni, casi anche i loro “gioielli” (alcuni dei quali molto antichi) ed in particolare a Giuseppe Salamone di Terranova di Pollino (PZ), Gigi Rizzo di Monopoli (BA) e Marco Cignitti di Subiaco (RM).

Ringrazio Fabio Dalmas, Francesco Durandi, Luca Paciaroni e tutta la *web community* di Liuteria Italia¹ e tutti gli amici che mi hanno sostenuto nelle varie fasi del progetto e in particolare Claudio Cappello, Ludwig Parentela, Roberto Luttino, Mattia Schirosa, Domenico Graziano, Lucio Gagliardi, Tommaso Massarelli, Michele Santoro, Ivano Decataldo, Fabrizio Trono e Maurizio Urso della liuteria *Storm Guitar* di Sava (TA), Andrea Bo ed Ezra Capogna del *No.mad studio* di Torino, Giorgia Emanuela Muia, Vittoria Agliozzo, Vincenzo Pranzo e Federica Ferretti.

Il ringraziamento più grande va, infine, alla mia famiglia per avere creduto sempre in me e avermi regalato l'opportunità di vivere un'esperienza universitaria meravigliosa, essenziale per la mia formazione umana, culturale e professionale.

Carlo Massarelli

¹ Liuteria Italia (<http://liuteriaitalia.forumup.it>)

Indice

	Introduzione	8
1	Analisi organologia dello strumento	10
1.1	Le origini	11
1.2	Diffusione, distribuzione e differenze	13
1.2.1	La zampogna a chiave campano-lucana	14
1.2.2	La surdulina	18
1.2.3	La zampogna zoppa	21
1.2.4	Nuove frontiere	23
2	Descrizione del funzionamento	26
2.1	Il corpo risonante	28
2.2	I fori e il padiglione nei legni	31
2.3	Il registro e gli effetti di abbellimento	33
2.4	Il funzionamento della zampogna	35
2.4.1	Le ance	35
2.4.2	La funzione del sacco	37
2.4.3	Come si utilizza	39
3	Sviluppo di un modello	41
3.1	Il modello per l'interfaccia	42
3.2	Il modello per la sintesi	46
4	L'interfaccia (livello I)	52
4.1	Stato dell'arte	54
4.2	Input	57
4.2.1	<i>Force sensitive resistor</i> (FSR)	57
4.2.2	Termoresistenze e termistori	58
4.2.3	Fotocellule e IR	58

4.2.4	Sensori di tocco capacitivi	59
4.2.5	<i>Push button</i>	60
4.2.6	Altri metodi	60
4.2.7	La scelta del sensore	61
4.2.8	Il sensore per l'otre	66
4.2.9	Sensori di pressione	67
4.2.10	Sensori di vibrazione	68
4.3	Output	68
4.3.1	RS-232	70
4.3.2	MIDI	70
4.3.3	Specifiche dei messaggi MIDI	72
4.3.4	Limiti del MIDI	74
4.3.5	<i>Open Sound Control</i> (OSC)	74
4.3.6	Altri metodi	76
4.3.7	Vantaggi e svantaggi	77
4.3.8	La porta MIDI	77
4.4	<i>Processing</i>	78
4.4.1	Arduino	80
4.4.2	I/O nell'interfaccia	82
4.4.3	Il codice nel progetto	83
5	Il sintetizzatore (livello II)	90
5.1	Analisi del suono della zampogna	91
5.1.1	Il metodo di registrazione e gli strumenti campionati	91
5.1.2	Algoritmi di analisi	93
5.1.3	Osservazioni I	98
5.1.4	Osservazioni II	100
5.2	Algoritmo di sintesi	104
5.3	Il programma e l'ambiente di sviluppo	106
5.3.1	Progettazione e realizzazione del <i>software</i>	107
5.3.2	Selezione dello strumento	109
5.3.3	Gestione dei messaggi di controllo	110
5.3.4	Note, tonalità e temperamento della scala	111
5.3.5	<i>Pitch bend</i>	118
5.3.6	Generazione del segnale e filtraggio	119
5.3.7	Involuppo di ampiezza e curve ADSR	124
5.3.8	Effetti aggiuntivi	127
5.4	Alcuni esempi	128

Conclusioni e sviluppi futuri	129
Appendice A	131
Bibliografia	136

Introduzione

La presente tesi, con la quale si conclude la mia esperienza di studio presso la terza facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino, illustra lo sviluppo di un progetto di “virtualizzazione” di uno strumento musicale: la zampogna. La scelta ricaduta su tale strumento è motivata dalla passione e l’interesse personale che lo scrivente coltiva da tempo per gli strumenti a sacco.

La zampogna è uno strumento di origini popolari, più precisamente pastorali, e viene indicata con termini dialettali differenti a seconda della zona geografica di origine. In Basilicata e in Cilento, ad esempio, viene utilizzata una terminologia molto suggestiva: “i suoni”. Questa denominazione sta ad indicare non solo la polifonia musicale di cui è capace tale strumento, ma anche la sua ricchezza e la completezza armonica, oltre che la capacità di produrre forte ed elevata sonorità. Per contro, la zampogna risente di forti limitazioni dal punto di vista dell’intonazione e dell’estensione musicale. Tale strumento musicale è stato oggetto, nel tempo, di un processo di “ghettizzazione” che oggi ne relega le poche apparizioni nei periodi di ricorrenze religiose e in particolare Natalizie. Se si pensa che già dai tempi dell’antica Roma personaggi illustri, come il poeta Marziale, avevano messo in discussione la validità degli strumenti a sacco si comprende come la zampogna non abbia mai goduto di forte considerazione.

Al contrario, questo tipo di strumento possiede doti musicali uniche; il progetto sviluppato in questa tesi nasce, pertanto, dalla volontà di rivalutarne le potenzialità e (perché no?) estenderne le funzionalità, attraverso l’analisi delle sue caratteristiche intrinseche e la loro trasposizione in chiave elettronica. La scelta di sviluppare uno strumento elettronico nasce da alcune considerazioni relative al comportamento degli strumenti musicali acustici. In generale, uno strumento musicale, per essere utilizzato a un livello accettabile, richiede un periodo di studio più o meno lungo a seconda della complessità del suo approccio e dei tempi di apprendimento individuali. La sua intonazione richiede inoltre tempo, competenze specifiche, esperienza e in alcuni casi può rivelarsi molto problematica. Ad esempio, i processi di manutenzione e accordatura sembrano come avvolti da un alone di mistero (le tecniche di costruzione e accordatura della zampogna sono custodite da soggetti non

sempre propensi all'insegnamento e alla condivisione della loro esperienza) e troppo spesso sono motivo di abbandono dello strumento per i neofiti che non posseggono le necessarie conoscenze e capacità specifiche. Dal punto di vista dell'utilizzo, uno strumento acustico richiede una quantità di energia per la produzione del suono e per il controllo dell'esecuzione. Nel caso specifico della zampogna, l'energia per la generazione del suono è notevolmente superiore rispetto a quella richiesta per altri strumenti a fiato; questa condizione incide notevolmente sui tempi di apprendimento che risultano, generalmente, molto lunghi.

Il progetto *e-Zampognè* ha come obiettivo la realizzazione di uno strumento elettronico "completo" che emuli il comportamento della zampogna sia dal punto di vista del controllo dell'esecuzione sia da quello del suono generato (che deve necessariamente risultare realistico). Tale strumento è dotato di un fattore di scalabilità (inesistente negli strumenti autentici) che permette all'utilizzatore la selezione di una tra N tipologie di base di zampogna, la regolazione dell'intonazione e del temperamento della scala musicale. Tutte le caratteristiche implementate fanno parte di un unico strumento compatto, completo e vantaggioso anche dal punto di vista economico.

Detto progetto consente la "correzione" dei caratteri artigianali degli strumenti reali, imperfetti e troppo spesso musicalmente imprecisi, nonché un incremento notevole delle possibilità musicali di utilizzazione. Permette, rispetto allo strumento originario, un approccio più semplice e rapido, con notevoli vantaggi in fase di studio e pratica consentendo al contempo, grazie alla maggiore flessibilità, nuove sperimentazioni (si pensi alla potenziale possibilità di eliminare, aggiungere o modificare una o più canne sonore, creando modelli ibridi di zampogna attualmente inesistenti) o l'utilizzo di sonorità tradizionali all'interno di nuovi panorami musicali. Infine, in virtù dell'articolazione del progetto su due livelli (interfaccia di controllo e modulo di sintesi sonora) sarà possibile utilizzarlo come *controller* generico, in grado di pilotare algoritmi di sintesi differenti (in tal modo l'approccio esecutivo della zampogna potrebbe fondersi con il suono di una chitarra o di un organo).

Nel primo e nel secondo capitolo della presente tesi vengono analizzati la storia, l'organologia della zampogna nelle sue varianti e i principi di funzionamento sia dal punto di vista fisico-acustico sia da quello pratico-esecutivo. Nel terzo capitolo viene sviluppato un modello semplificato dello strumento, studiato sulla base dei principi di funzionamento e delle approssimazioni che essi comportano. Il quarto e il quinto capitolo trattano rispettivamente l'analisi della tecnologia necessaria allo sviluppo dell'interfaccia di controllo (*hardware/software*) e il processo di sviluppo del programma (*software*) che si occupa della sintesi del suono.

Capitolo 1

Analisi organologica dello strumento

Con il termine zampogna si fa riferimento generalmente all'insieme degli strumenti musicali il cui suono viene prodotto per mezzo della vibrazione dell'aria, contenuta in un serbatoio flessibile interposto fra la bocca del suonatore e più aerofoni ad ancia². La riserva d'aria è contenuta in un sacco (tradizionalmente di pelle animale ma realizzata anche con materiali diversi); detto sacco consente sia di ritenere una quantità d'aria sufficiente ad alimentare le canne sonore mentre il suonatore riprende fiato sia di alimentare più di una canna sonora contemporaneamente¹. Dall'impianto di base sopra esposto sono derivati molteplici modelli di strumenti musicali, anche molto diversi tra loro, a seguito dell'adattamento del sacco a strumenti ad ancia preesistenti, producendo così una varietà di combinazioni che nel tempo sono state a loro volta ulteriormente trasformate e diversificate¹.

Nonostante i termini cornamusa e zampogna indichino in realtà la stessa categoria di strumenti (il secondo ha in Italia effettiva funzione d'uso popolare mentre il primo avrebbe più un sapore letterario³) si nota una tendenza collettiva a identificare con cornamusa gli aerofoni a riserva d'aria muniti di singola canna del canto più bordoni⁴, ciascuno impiantato autonomamente nel sacco e con zampogna quelli muniti di doppia canna del canto utilizzata a mani divise e bordoni impiantati tutti nello stesso blocco posto frontalmente. Spesso nella presente tesi si utilizzerà come sinonimo di canna del canto il termine anglosassone *chanter*, che non ha trovato un termine corrispettivo nella lingua Italiana (se non le diverse nomenclature dialettali locali) e viene

² F. Guizzi – Guida alla musica popolare in Italia, Gli strumenti. p. 224.

³ F. Guizzi, R. Leydi – Le zampogne in Italia. p.17.

⁴ Il termine bordone indica in musica una nota singola, fissa e non modificabile, che ha in genere funzione di accompagnamento. Nelle zampogne queste note sono emesse da canne sonore prive di fori digitali che, con le dovute eccezioni riferite alle nomenclature dialettali locali, vengono chiamate canne “bordone” o più semplicemente “bordoni”.

ampiamente utilizzato anche per le zampogne. Pertanto, si identificano con i “due chanter” le canne sonore munite di fori digitali, con le quali si eseguono le linee melodiche.

Si può quindi definire zampogna l’aerofono a sacco a doppio chanter, diffuso nelle sue molteplici forme e varietà nell’Italia centro-meridionale (dal Lazio settentrionale alla Calabria) e in Sicilia e cornamusa lo strumento a singolo chanter diffuso nell’Italia settentrionale e nell’Europa occidentale (Regno Unito, Irlanda, Spagna, Francia, Germania, ecc.). In figura 1-1. sono riportati i due i tipi di strumento a sacco; le differenze tra le due tipologie risultano più che evidenti.

1.1 Le origini

Sulle origini degli strumenti musicali alimentati a sacco e in particolare sulle zampogne non si hanno fonti certe, tuttavia è possibile provare a ricostruire la storia e la sua evoluzione considerando alcune ipotesi. In questa sede vengono considerate le ipotesi di Guizzi e Leydi, illustrate in *Le Zampogne in Italia* (1985).

Nonostante non se ne abbia una descrizione esauriente, risale al I secolo d.C. l’esistenza, a Roma, di uno strumento musicale con riserva d’aria, chiamato “*utricularis*”, suonato persino dall’imperatore Nerone⁵. Si ipotizza che l’origine di questo sistema di alimentazione dell’aria fosse stato importato dall’Oriente e poi applicato a una coppia di “*tibiae*” (strumenti musicali ad ancia doppia del tempo), equivalente romano degli *auloi* greci. Queste, di diversa lunghezza, venivano in precedenza suonate contemporaneamente e per insufflazione diretta. L’ancia semplice è sicuramente più antica e primitiva di quella doppia; tuttavia l’ipotesi che considera il suo utilizzo (nelle zampogne) in epoche precedenti a quello delle ance doppie è discutibile. L’ipotesi più convincente è quella che asserisce origini e sviluppi differenti, ma soprattutto individuali, delle due tipologie di zampogna, ognuna derivata dagli strumenti “doppi” corrispondenti (doppio oboe e doppio clarinetto) e non l’una dall’altra.

Le prime apparizioni in Italia delle zampogne, documentate attraverso iconografie antiche, certamente riconoscibili come antecedenti storici delle attuali zampogne centro-meridionali, sono relativamente tarde (non anteriori al XV secolo d.C.) in rapporto agli strumenti bicalami (a doppia canna sonora) del mondo antico e non danno quindi la possibilità di stabilire con certezza una derivazione dall’*utricularis* romano⁶.

⁵ Svetonio – Nero.

⁶ F.Guizzi, R.Leydi – *Le zampogne in Italia*, p.59.



Fig. 1-1. Illustrazioni di uno strumento a singolo chanter più bordoni (a) e di uno a doppio chanter più bordoni (b)⁷.

L’attestazione della presenza dei bordoni in antichità, probabilmente l’elemento più caratteristico della categoria degli attuali aerofoni a sacco, non è certa e la questione è dibattuta. L’ipotesi che vuole che i bordoni non fossero presenti in origine nella zampogna romana e che siano stati applicati successivamente, precisamente in epoca medievale, trova riscontro nei rispettivi sistemi musicali. La linea sommariamente tracciata, lungo la quale pare svilupparsi la zampogna nel centro-meridione d’Italia è la seguente:

1. comparsa del doppio chanter, erede dell’*utricularis* romano;
2. prima fissazione dei due tipi fondamentali (a canne eguali e a canne diseguali);
3. acquisizione del bordone;
4. introduzione di una canna risonante del tipo bombardarda (parente dell’oboe moderno).

Degna di menzione è la sordellina napoletana, particolarissimo modello di zampogna “aristocratica” a doppio chanter con canneggio cilindrico, dotata di numerose chiavi per la modulazione del suono sia sui chanter sia sui bordoni. Nonostante ad oggi non sia disponibile un solo esemplare ben conservato di tale strumento musicale e ci si può riferire soltanto ad alcune

⁷ Rielaborazione da <http://www.bandadarfo.eu/>. Nell’immagine originale vengono illustrati un “baghet” bergamasco e una zampogna a chiave laziale-molisana.

testimonianze più o meno precise, si può ritenere che la moda della “pastorellerie”, che generò in Francia la *musette de cour*, sia stata interpretata in Italia tramite una trasformazione via via più evoluta di uno strumento che, in partenza, altro non era che una zampogna con chanter divergenti di eguale lunghezza del tipo mediterraneo che progressivamente si allontanò dal modello originario fino a divenire uno strumento non più a bordone, ma capace di suonare “tutte le tipologie di canzoni”.⁸

1.2 Diffusione, distribuzione e differenze

Qualunque sia stata la genesi di tale strumento, all’attualità in Italia sono presenti numerosi modelli di zampogna, anche molto diversi fra loro. Non solo; è possibile affermare che la maggior parte degli strumenti musicali tradizionali in uso prima del ventesimo secolo sono al giorno d’oggi presenti e costruiti secondo forme e procedimenti sostanzialmente immutati nel tempo⁹. La mappa geografica esposta in figura 1-2. illustra la distribuzione dei diversi tipi di zampogna tradizionale, indicando tredici modelli principali.

Il presente studio non si propone di esaminare tutte le tipologie di zampogna in ogni loro variante caratteristica, ma intende individuare alcuni modelli principali, focalizzando l’attenzione su di essi. È risultato pertanto necessario operare una prima divisione fra le zampogne più diffuse e quelle meno comuni, escludendo quelle oramai estinte, come la zampogna zoppa della Valle Siciliana e quella di Fossalto, e quelle non appartenenti alle regioni del centro-sud d’Italia (pive istriane). Nello sviluppo dello studio sono stati presi in considerazione i modelli di alcuni strumenti che presentano evidenti differenze nei parametri dell’estensione melodica della scala, del timbro e del tipo di canna risonante utilizzato. Verranno pertanto di seguito descritte la zampogna a chiave campano-lucana, forse la più classica insieme a quella molisana, la surdulina del Pollino e la zampogna zoppa. Si passerà successivamente alla descrizione dei nuovi e recenti strumenti musicali frutto di sperimentazione che si propongono come importante passo in avanti per l’arricchimento dell’intera categoria degli aerofoni a sacco.

⁸ F.Guizzi, R.Leydi – Le zampogne in Italia, p.88.

⁹ F.Guizzi, R.Leydi – Le zampogne in Italia, p.8.



1. “Ciaramelle” di Amatrice (Lazio)
2. Z. “zoppa” della Valle Siciliana (Abruzzo)
3. Z. “zoppa” (Abruzzo/Lazio/Molise)
4. Z. “a chiave” laziale-molisana (Lazio/Molise)
5. Z. “a chiave” di transizione (Campania)
6. Z. “a chiave” campano-lucana (Basilicata/Campania)
7. “Surdulina” (Basilicata/Calabria)
8. Z. “a chiave” calabrese (Calabria)
9. “Ciaramelle a paro” (Calabria/Sicilia)
10. Z. “a chiave” siciliana (Sicilia)
11. Z. di Fossalto (Molise)
12. Z. “a moderna” (Calabria)
13. Piva istriana (Istria, Croazia)

Fig. 1-2. La mappa geografica della distribuzione della zampogna in Italia¹⁰.

1.2.1 La zampogna a chiave campano-lucana

Questo modello di zampogna a chiave, diffuso nella Lucania, regione storica dell’Italia antica che comprendeva quasi tutta l’odierna Basilicata con l’aggiunta a ovest del Cilento e del Vallo di Diano, viene identificato dall’impianto in un unico blocco frontale di quattro canne diseguali, due di canto (già dette chanter) e due bordoni, tutte caratterizzate dalla presenza di ance doppie. La sua tipologia è strettamente collegata a quella della zampogna a chiave laziale-molisana, da cui però si differenzia per aver entrambi i bordoni sempre funzionanti e per aver talvolta forme diverse di perforazione interna¹¹ e di estetica esterna¹². Le quattro canne sonore sono separate fra loro e divergenti; hanno

¹⁰ F.Guizzi, R.Leydi – Le zampogne in Italia, pag.172

¹¹ La differenza principale fra i corpi risonanti utilizzati nelle zampogne dell’Italia centrale rispetto a quelle lucane risiede nel fattore di conicità tendenzialmente maggiore, che ne conferisce un timbro più squillante (anche dettato dall’uso sovente di padiglioni completamente svasati) e può anche generare una naturale predisposizione dello strumento a un’intonazione più alta (dell’ordine di un semitono o poco più) a parità di dimensioni. Inoltre, può differenziarsi per la costruzione dei chanter a campana fissa. Tuttavia, specie se in confronto con gli altri modelli, le differenze timbriche restano minime e quelle nei termini della diteggiatura e della scala melodica risultano praticamente inesistenti.

¹² G. M. Gala, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 7.

profilo interno tronco-conico, con fattore di conicità variabile a seconda del tipo di canna e profilo esterno leggermente ellissoidale, con interruzioni sagomali della conicità esterna a causa dei tratti ornamentali di tornitura o delle parti d'innesto dei vari componenti¹³. La particolare tecnica di perforazione della canna sonora, eseguita al tornio con l'ausilio di più di una punta perforante e/o alesatori, comporta una generale irregolarità del canneggio, non perfettamente conico ma realizzato a gradini più o meno smussati a seconda della finezza e accuratezza della costruzione¹⁴.

Il chanter destro, detto *ritta* o *dritta*, è la minore delle due canne melodiche; esso è composto da un fuso (corpo risonante principale) provvisto di nove fori, di cui solamente cinque digitali, realmente utilizzati in fase di esecuzione e una campana “chiusa” o “semichiusa”, cioè avente profilo non completamente svasato (equivalente al modello di campana “avezzanese” nelle zampogne del centro Italia). Dei fori digitali, uno è posizionato in alto posteriormente, in corrispondenza del pollice, mentre in corrispondenza del mignolo sono posizionati due fori paralleli, uno dei quali può essere occluso completamente tramite cera¹⁵. Il foro immediatamente inferiore a quelli digitali è utilizzato come sfiato, per intonare lo strumento, così come i piccoli fori laterali ubicati inferiormente e diametralmente opposti fra loro, detti “orecchie”.

Il chanter sinistro, detto *manca* o *mancina*, ha dimensioni maggiori di quello destro; sovente è utilizzato per l'esecuzione dell'accompagnamento o per il contrappunto alla linea melodica eseguita sul primo, accentuando così la cadenza ritmica dell'esecuzione¹⁶. La canna è formata da un lungo fuso a canneggio conico con quattro fori digitali di modulazione, tutti posti anteriormente in asse, e una campana chiusa, di dimensioni notevolmente maggiori di quella montata sulla *ritta*, che presenta due fori di sfiato laterali per l'intonazione. Il foro digitale inferiore, a causa del suo posizionamento (distante dagli altri fori), non si può occludere direttamente con il dito mignolo; la sua occlusione avviene pertanto tramite una chiave artigianale. Le chiavi montate sulle zampogne possono discostarsi anche notevolmente da quelle più moderne utilizzate per aerofoni come clarinetto o saxofono; nella maggior parte dei casi dette chiavi non sono visibili in quanto vengono celate tramite coperchi forati, diretti discendenti delle *fontanelle* presenti sulle bombarde.

¹³ G. M. Gala, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 8.

¹⁴ Questo è uno dei principali fattori che fa della zampogna uno strumento caratterizzato da instabilità dell'intonazione, obbligando il suonatore a continue verifiche e aggiustamenti e rendendo praticamente impossibile la standardizzazione delle ance, a differenza di quanto succede per le cornamuse.

¹⁵ La scelta del foro viene operata in base alla tecnica di montaggio delle canne sonore nel blocco che può essere classica o “alla mancina” ossia con la posizione invertita dei chanter.

¹⁶ G. M. Gala, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 10.

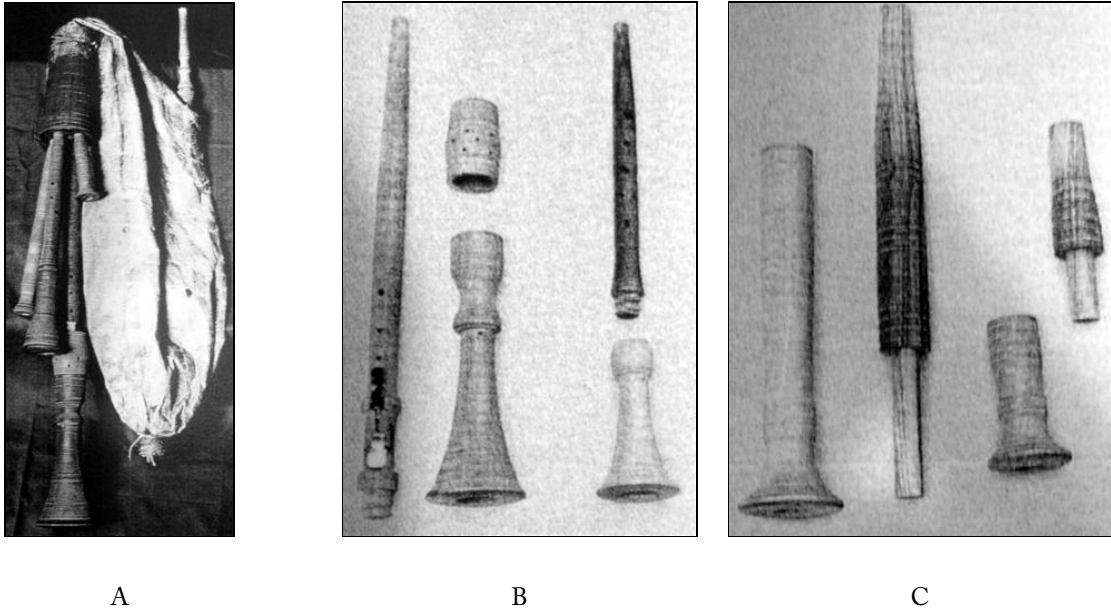


Fig. 1-3. Una zampogna a chiave campano-lucana (a) e i suoi componenti: chanter (b) e bordoni (c)¹⁷.

Il bordone maggiore, detto *trumm* o *trombone*, è una delle due canne sonore dedicate all'emissione di un'unica nota fissa che fa da tappeto all'intera esecuzione melodica dei chanter. Esso è composto da un fuso avente profilo esterno conico con una terminazione cilindrica, alla quale si innesta il *calzetto*, o campana del bordone, nettamente differente come forma esterna e profilo interno da quelle montate sui chanter. Il canneggio ha perforazione tronco-conica con fattore di conicità notevolmente inferiore a quello dei chanter, citati in precedenza, tanto da venire associato, a volte, a un profilo cilindrico¹⁸. Il fattore di conicità cambia drasticamente nella parte inferiore (quella più lontana dall'innesto con il fuso) invertendosi, tendendo cioè a richiudere il canneggio invece di aprirlo come nel caso delle campane svasate. Non possiede fori digitali o di sfiato in quanto l'intonazione è attuata completamente per mezzo di aggiustamenti della posizione del calzetto, la cui parziale estrazione comporta l'allungamento della lunghezza di risonanza equivalente mentre l'inserimento la sua riduzione.

Il bordone minore, detto *fischietto* o *scandillo*, è sostanzialmente identico nella struttura al bordone maggiore, se non per le sue minori dimensioni, in genere dimezzate. L'innesto del calzetto sul fuso può richiedere l'utilizzo di spago o cotone come guarnizione per assicurare la salda tenuta dei blocchi.

¹⁷ N. Scaldaferrì, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 60

¹⁸ G. M. Gala, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 10.

I legni utilizzati per la costruzione di questa zampogna sono diversi; è possibile identificare nelle coppie ulivo-acero, ulivo-ciliegio, bosso-acero e pruno-ciliegio i principali abbinamenti¹⁹. L'uso di legni differenti si giustifica in quanto alcune parti dello strumento hanno funzioni indipendenti dalla risonanza; è pertanto possibile utilizzare materiali la cui capacità elastica di vibrazione è in parte o completamente ininfluenza. Questo è il caso delle campane, del blocco di innesto delle canne, dell'insufflatore e del coperchio presente sulla canna sinistra in corrispondenza della chiave.

L'estensione limitata dello strumento è motivata dall'uso di un doppio chanter che consente l'impegno di una sola mano per ogni canna sonora. A prescindere dalle dimensioni dello strumento, la scala e in particolare i rapporti delle note suonate rimangono invariati. Ciò che cambia, invece, è l'intonazione di base che è strettamente dipendente dalla "taglia" dello strumento, anche se può essere variata di una certa quantità (generalmente modesta e subordinata ai limiti fisici dei corpi risonanti). Ipotizzando uno strumento di dimensioni intermedie (approssimativamente della lunghezza di 4-5 palmi), tipicamente intonato in Do4 (cioè il Do centrale del pianoforte) e condividendo la scelta di associare la tonalità alla nota "tonica" del chanter destro²⁰, che nel caso della zampogna a chiave coincide con la penultima nota dall'alto in basso, la sua estensione è così strutturata:

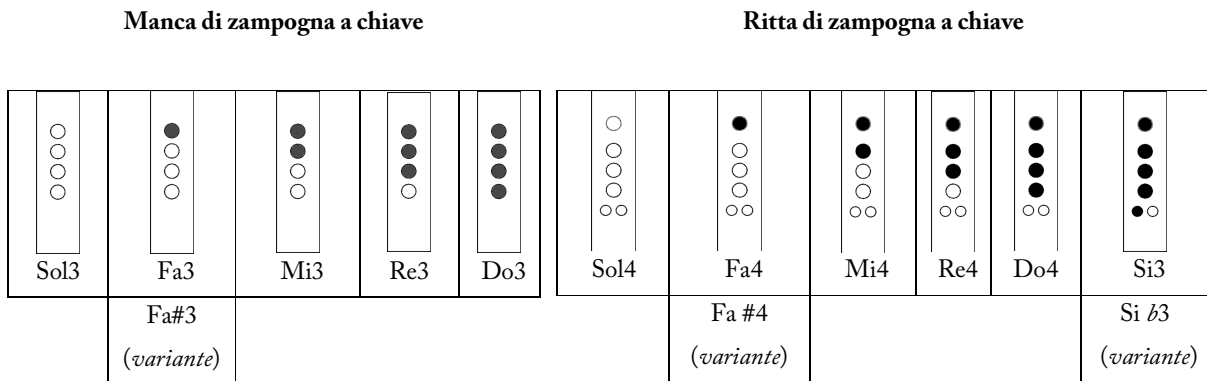


Fig. 1-4. Schemi delle diteggiature e delle estensioni sui chanter sinistro e destro di una zampogna a chiave lucana.

Seguendo la medesima configurazione, il bordone maggiore eseguirà la nota di Sol3 mentre il bordone minore quella di Sol4. È facile intuire che le due canne dedicate allo sviluppo della

¹⁹ Questi legni risultano i più utilizzati dai costruttori conosciuti durante la fase di ricerca sul campo.

²⁰ Nell'ottica del confronto dell'estensione e delle diteggiature nelle differenti zampogne, è necessario individuare un punto di riferimento comune. Fra le varie possibilità (nota più alta, nota più bassa, note di bordone) è risultato preferibile scegliere la tonica della canna destra come tonalità dello strumento, in quanto questa è la canna meno soggetta a cambiamenti radicali nel passaggio da un modello ad un altro.

melodia eseguono le stesse note, dalla tonica alla dominante della scala maggiore ad un'ottava di differenza, con l'unica eccezione della mano sul chanter destro, che sfruttando l'uso del pollice si estende fino alla sensibile al di sotto della tonica. I bordoni, invece, sono intonati entrambi sulla dominante, l'equivalente nota più alta di ogni chanter, e limitano le possibilità armoniche e melodiche dello strumento all'esclusiva scala maggiore diatonica e ai soli due accordi di tonica e di quinto grado (quindi nel caso che si illustra al Do maggiore e al Sol maggiore). In figura 1-5 vengono illustrate le possibili variazioni dell'intonazione delle note, riscontrate in fase di ricerca, per alcune tipologie tradizionali di esecuzione.

1.2.2. La surdulina

La *surdulina* è presente sul territorio in modo localizzato: l'area di distribuzione comprende l'estrema porzione meridionale della Lucania e buona parte della provincia di Cosenza, soprattutto nelle comunità *Arbëreshë*²¹ (nelle località ad influenza albanese lo strumento viene chiamato *karramunxia*). Le caratteristiche di questo modello di zampogna, che lo differenziano nettamente dalla precedente zampogna a chiave, si riferiscono alla lunghezza dei chanter, al profilo di perforazione interna, al tipo di ance utilizzate e all'estensione della scala. Sia per ragioni estetiche sia dal punto di vista della diteggiatura dello strumento, non è possibile identificare un modello standard di *surdulina*, così come nel caso della zampogna a chiave; tuttavia il modello della *surdulina* rinvenibile nelle località del Pollino (Farneta(CS), Terranova di Pollino(PZ), San Costantino Albanese (PZ), ecc.) è stato riconosciuto come la tipologia di strumento più classica e diffusa anche al di fuori delle località di stretta appartenenza. Nonostante le testimonianze di esemplari dotati di tre bordoni (il minore può essere raddoppiato), nella maggioranza dei casi lo strumento presenta due chanter di pari lunghezza, un bordone minore e un bordone maggiore di dimensioni superiori a quelle dei chanter (caso unico nelle zampogne italiane). L'accoppiamento di ance semplici a canneggi, sempre perfettamente cilindrici e di piccolo diametro, unito alla particolare disposizione dei fori sui due chanter, rendono la *surdulina* il modello di zampogna italiana più piccolo in circolazione. Non solo; insieme alla zampogna di Fossalto è l'unico caso fra gli aerofoni a sacco italiani che utilizza doppi clarinetti a dita parallele, caratteristica tipica degli strumenti del Mediterraneo e dei Balcani, da cui però si differenzia per la "zeppatura" del chanter sinistro e per la presenza delle canne di bordone²².

²¹ F. Guizzi, R. Leydi – Le zampogne in Italia, p.204.

²² F. Guizzi, R. Leydi – Le zampogne in Italia, p.206

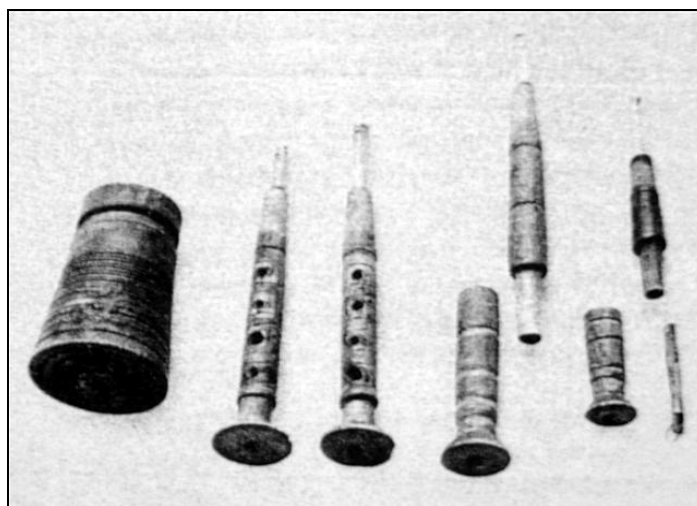


Fig. 1-5. I componenti di una surdulina. Da sinistra verso destra il blocco di innesto, i chanter e i bordoni²³.

I chanter della surdulina sono ricavati da un solo pezzo di legno, a differenza di quelli della zampogna a chiave in cui i legni utilizzati per la realizzazione della campana sono diversi da quelli del fuso. La forma del disco, più o meno largo, con cui termina il profilo esterno del fuso è da ritenersi di funzione puramente estetica in quanto non vi è una corrispondente sagomatura interna del padiglione. Solo in tempi recenti alcuni costruttori, fra i quali Leonardo Lanza e Giuseppe Salamone, hanno iniziato a costruire modelli con chanter a campana semichiusa sul modello della zampogna a paro calabrese²⁴ o di quella a chiave lucana. Ogni chanter presenta quattro fori digitali tutta anteriori e un foro di sfiato inferiore posto lateralmente per intonazione di base²⁵. Questa configurazione esclude la possibilità di utilizzo del pollice in fase di esecuzione anche sul chanter destro che quindi risente di una modifica dell'estensione, come illustrato in figura 1-5. Come per gli altri componenti della zampogna, la nomenclatura dei chanter risente dei dialetti locali; tuttavia i termini *ritta* e *manca* (utilizzati anche nella zampogna a chiave) vengono utilizzati comunemente. Il dato più importante, che rende inconfondibile lo strumento e ne determina i repertori musicali, è rappresentato dalla zeppatura del chanter sinistro, cioè l'occlusione definitiva della sua campana e della parte inferiore del canneggio, che nel caso di occlusione di tutti i fori digitali, non permette

²³ N. Scaldaferrì, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 60

²⁴ N. Scaldaferrì, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 68

²⁵ Assente sul chanter sinistro.

l'irraggiamento delle vibrazioni sonore. Dal punto di vista esecutivo ciò si traduce nella possibilità di eseguire pause e note staccate, caratteristica singolare negli strumenti a sacco²⁶.

Il bordone maggiore, detto *trumm* o *trombone*, si compone di un fuso, avente profilo interno cilindrico, e di un calzetto cilindrico o che presenta conicità inversa nella parte inferiore, così come per la zampogna a chiave. Questa condizione “ripristina” il diametro iniziale del canneggio, successivamente allargato per via dell’innesto di un secondo componente. Così come per la zampogna a chiave, non presentando fori digitali e di sfiato, l’intonazione del bordone è effettuata esclusivamente per mezzo di aggiustamenti della posizione del calzetto. La morfologia del bordone minore, detto *fischiello* o *scandillo*, rimane sostanzialmente invariata da quella del bordone maggiore, se non per le lunghezze inferiori.

Anche gli abbinamenti dei legni utilizzati nella costruzione dei singoli componenti non differiscono; in particolare ricorrono i seguenti accoppiamenti: ulivo-acero, bosso-acero e anche ulivo-ulivo, bosso-bosso, ebano-ciliegio.

Mantenendo lo stesso criterio di associazione della tonalità precedentemente adottato, una surdulina in Do4 (di grande taglia, con chanter di lunghezza pari a circa 30 cm), presenta la seguente estensione musicale:

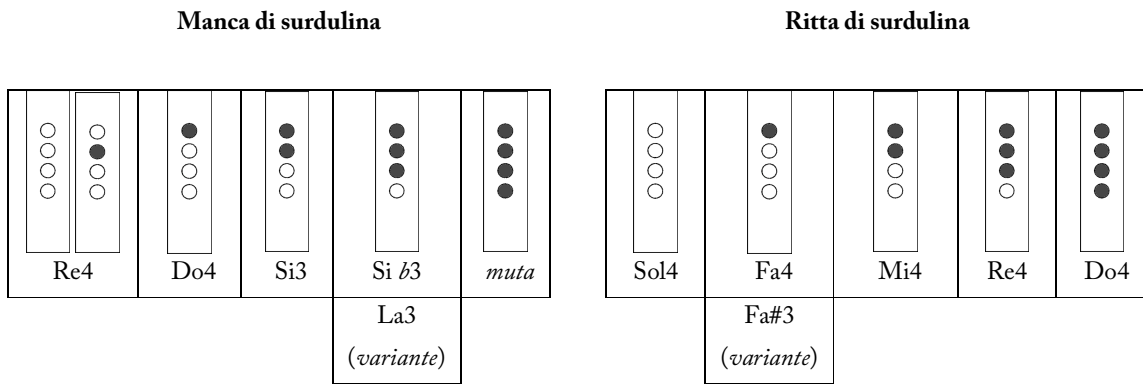


Fig. 1-6. Schemi delle diteggiature e delle estensioni sui chanter sinistro e destro di una surdulina del Pollino

Il bordone maggiore esegue la nota di Sol3 mentre il minore quella di Sol4. A differenza della zampogna a chiave, la canna ritta è privata della nota sensibile inferiore alla tonica, e i due chanter non sviluppano la stessa estensione su ottave differenti, ma hanno fra loro un rapporto musicale di quarta. Come nel caso precedente, i bordoni sono intonati entrambi sulla dominante e il

²⁶ Questa pratica trova una corrispondenza solamente nella cornamusa irlandese *Uilleann Pipe*, che non utilizza una zappatura fissa per mezzo di tappi o cera, come succede nella surdulina, ma sfrutta la mobilità delle gambe dell’esecutore che in posizione “da seduto” può zeppare o meno il canneggio.

tipo di configurazione dello strumento ne confina le possibilità armoniche e melodiche all'esclusiva scala maggiore diatonica e ai due accordi di tonica e di quinto grado. In figura 1.6 vengono raffigurate le possibili varianti di diteggiatura e di intonazione delle note. Come si evince dalla medesima illustrazione, a parità di note eseguite le dimensioni dei chanter, e in particolare la lunghezza (apprezzabile in fig. 1.5), sono notevolmente ridotte rispetto a quelli presenti nella zampogna a chiave. Detta diversità è motivata dall'adozione del particolare tipo di canneggio interno e delle ance utilizzate²⁷. Si osserva, ancora, che l'estensione del chanter sinistro non risente delle dimensioni (ridotte) del fuso. Inoltre, mentre in tutti gli altri tipi di zampogne italiane sono mantenute le proporzioni della canna sonora, rispetto alla sua estensione melodica, quello in esame conserva la forma e le dimensioni del chanter destro adattandone ancia e diametro dei fori; questo fattore, insieme all'introduzione della zeppa, rappresentano la causa del cambiamento del timbro della canna sonora rispetto a quello posseduto dalla sua canna gemella.

1.2.3 La zampogna zoppa

Insieme al modello "a paro", con cui condivide molte caratteristiche soprattutto dal punto di vista dell'estensione e della diteggiatura, la zampogna zoppa rappresenta forse il modello di aerofono a sacco bicalamo più antico in Italia. La si trova in alcune regioni dell'Italia centrale anche se, a causa della presenza della zampogna a chiave considerata una sua variante moderna, vive un periodo di crisi. Esistono molti tipi di zampogna zoppa, che differiscono l'una dall'altra soprattutto per il profilo interno del padiglione, l'estensione della scala e il temperamento delle note; nella presente tesi viene trattato il modello più classico diffuso in Abruzzo, Lazio e Molise.

La zampogna zoppa è sostanzialmente identica a quella a chiave laziale-molisana, a meno della canna sinistra del canto. Come riferito in precedenza il modello di zampogna a chiave molisana con campane di tipo semichiuso (o "avezzanese") è assimilabile a quello della zampogna a chiave campano-lucana; per l'analisi dell'organologia del chanter destro e dei bordoni si rimanda pertanto al par. 1.2.1.

Il chanter sinistro della zampogna zoppa differisce da quello presente nel tipo "a chiave" per le dimensioni inferiori, il differente posizionamento dei fori digitali, l'assenza di chiave e il rapporto fra la sua estensione melodica e quella del chanter destro (di quarta, come nel caso della surdulina senza zeppa o della zampogna "a paro"). È possibile associare il profilo interno del chanter sinistro a quello del chanter destro di una zampogna zoppa (o a chiave) di taglia maggiore e tonalità inferiore.

²⁷ La questione viene approfondita nel cap. 2.

Considerando l'assenza del foro posteriore, le dimensioni e l'intonazione dell'ancia doppia accoppiata alla canna risonante si individua un rapporto indicativo fra i chanter (sinistro/destro) pari a 6:5, cioè un rapporto di terza minore dal punto di vista musicale. Seguendo questo ragionamento il chanter sinistro di una zampogna zoppa in Sol4 (di misura "27" o 3 palmi, secondo il criterio in uso nel meridione d'Italia) sarebbe acusticamente equivalente al chanter destro di una zampogna a chiave in Mi4, di misura "32-34" o 4 palmi.



Fig. 1-7. Zampogna zoppa abruzzese costruita da Marco Tomassi

Manca di zampogna zoppa

Ritta di zampogna zoppa

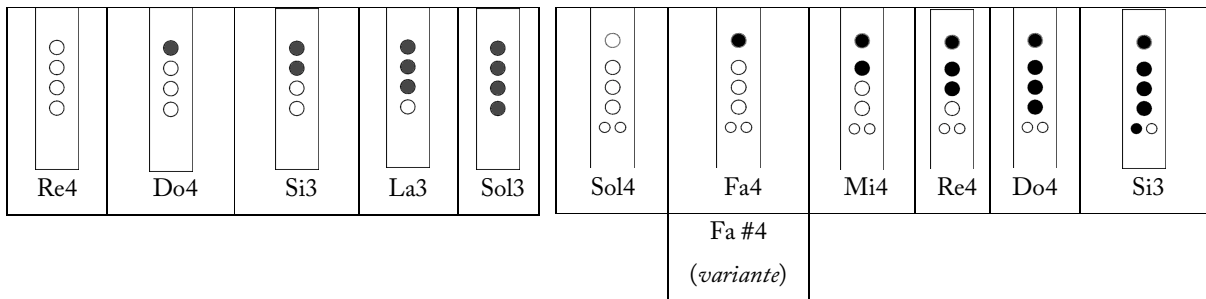


Fig. 1-8. Schemi delle diteggiature e delle estensioni sui chanter sinistro e destro di una zampogna zoppa dell'Italia centrale (tonalità di riferimento: Do4).

1.2.4. Nuove frontiere

In epoca recente si è verificata una significativa modifica dell'approccio musicale della zampogna nell'ottica del suo inserimento in un contesto musicale più esteso e quindi più esigente dal punto di vista dell'estensione melodico-armonica dello strumento. In particolare si è potuto riscontrare la partecipazione delle zampogne nei panorami musicali più svariati, quali *world music*, *revival folk*, musica d'orchestra, fino ai più moderni generi di musica elettronica, i cui canoni musicali di certo non possono abbinarsi a quelli di una zampogna tradizionale. Alcuni musicisti e costruttori hanno apportato modifiche alla struttura del bordone maggiore di una zampogna a chiave laziale-molisana e non solo, che hanno conferito allo strumento nuove possibilità armoniche, consentendo così all'esecutore di suonare in "insieme", svincolando l'uso della zampogna da un contesto musicale prevalentemente solista e diatonico (cioè confinato a un'unica scala melodica) inserendola in un contesto "cromatico". Non si è ritenuto in questa sede analizzarne le motivazioni, ancora oggi motivo di dibattito e controversie fra musicisti, studiosi, zampognari e "zampognisti", limitando l'intervento alla sola presa d'atto del fenomeno, interessante dal punto di vista organologico per le possibilità musicali che introduce.

Fra il 1994 e il 1996²⁸ il musicista molisano Pietro Ricci ha ideato un metodo, successivamente perfezionato fino a una definitiva affermazione, di modifica della zampogna a chiave molisana "25" che ha permesso la produzione di un tipo di strumento innovativo a tre chanter, intonato in Sol maggiore (Sol4). Non si è ritenuto necessario riportare la struttura organica di detto strumento, né la sua diteggiatura nel dettaglio, così come effettuato per i modelli precedenti, in quanto pare sufficiente sottolineare la tendenza dei due chanter a un comportamento semi-cromatico (in particolare si rileva che tramite diteggiature "a forchetta" è possibile ottenere alterazioni della scala²⁹ e la trasformazione del bordone maggiore in un terzo chanter dotato di due fori digitali occludibili, uno per volta o contemporaneamente, con il pollice della mano impegnata sul chanter sinistro. Occludendo detti fori contemporaneamente viene ripristinato il comportamento classico del bordone, che si intona sulla dominante della scala (Re4); lasciandoli aperti, invece, la scala viene estesa al primo o al secondo semitono successivo (Mi b4 e Mi4). Si rileva, infine, che il primo foro di intonazione presente sulla ritta, allineato con l'ultimo foro digitale, è posto a una distanza ravvicinata da quest'ultimo, in modo tale da permetterne la sua occlusione per mezzo del

²⁸ M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 220.

²⁹ Va specificato che le alterazioni sono teoricamente possibili su tutte le zampogne per mezzo di diteggiature a forchetta, ma nella realtà pratica poche di queste riescono a ottenere la corretta intonazione delle note fuori scala, invece possibile nelle zampogne modificate.

dito mignolo, già impegnato sul primo. L'estensione del chanter viene incrementata di un semitono, rendendo così possibile l'esecuzione della nota Fa4, corrispondente alla settima minore della scala.



A



B

Fig. 1-9. Particolari delle chiavi sul chanter destro (a) e sul bordone (b) della sordellina molisana.

Una seconda tipologia esaminata è la “sordellina molisana”, zampogna di Lino Miniscalco, musicista e costruttore molisano che, partendo dalle misure di una “28 zoppa” priva di chiave, ne ha modificato il caneggio interno, la posizione e il numero dei fori, realizzando una zampogna “cromatica” munita di chiavi su chanter destro e bordone maggiore³⁰. Così come per il chanter destro della zampogna a chiave, nel modello di Ricci vengono definite diteggiature ben precise per ottenere le alterazioni della scala diatonica; facilitano la cosa l'introduzione di doppi fori facilitano. La modifica più interessante apportata dal Miniscalco consiste però nell'introduzione sul chanter destro di una chiave che, consentendo l'occlusione di un foro aggiunto superiormente a quelli previsti dal modello classico, estende la scala fino al sesto grado (Mi5). Ultima caratteristica degna di nota è l'introduzione di una seconda chiave, montata sul bordone, che ne incrementa l'estensione fino alla nota di Fa4. Entrambe le tipologie di chiave sono illustrate in figura 1-9.

Tale innovativo modello è stato denominato *sordellina molisana* in riferimento a un tipo di zampogna analoga a quella zoppa (ricordata in Molise con il nome di *sordellina*, oppure *sardellina* o *surdulina*) e all'antica sordellina napoletana, cornamusa seicentesca fornita di più chiavi³¹, menzionata nel par. 1.1.

Il fenomeno sopra descritto ha dato vita a tutta una serie di esperimenti costruttivi che riguardano non soltanto il centro Italia, ma trovano riscontro anche in altre aree geografiche

³⁰ M. Gioielli – La sordellina molisana, Utriculus n.31 lug./set. 1999, p.41.

³¹ M. Gioielli – La sordellina molisana, Utriculus n.31 lug./set. 1999, p.41.

caratterizzate da forte presenza di zampogne (ad es. Calabria) o che hanno definitivamente perduto questa tradizione (ad es. Puglia). Nella stessa tipologia di strumenti “modificati” possono annoverarsi le zampogne “27” in Sol4 costruite da Marco Tomassi di Cassino (FR), che si differenziano dalle precedenti per il numero di fori sul bordone (tre, come nella sordellina molisana), e per il criterio di occlusione (senza chiavi come nella zampogna di Ricci).

Capitolo 2

Descrizione del funzionamento

Come innanzi descritto, le canne sonore delle zampogne sono direttamente riconducibili a due particolari famiglie di strumenti musicali: quelli ad ancia semplice (clarinetti) e quelli ad ancia doppia (oboi). Per comprendere a fondo il funzionamento e le possibilità esecutive degli strumenti musicali con otre, rispetto agli strumenti a fiato generici, è necessario approfondire alcune nozioni su questi ultimi e, in particolare, occorre analizzare i principi di generazione e modulazione del suono, il ruolo dei componenti che costituiscono gli strumenti e i rapporti fra questi e l'utilizzatore in fase di esecuzione.

Affinché si possa irradiare il suono in una stanza, l'aria all'interno di uno strumento a fiato deve vibrare.

L'aria è composta di molecole e la colonna d'aria musicale è un vibratore complesso con numerosi modi di vibrazione. Questi modi di vibrazione devono essere eccitati da energie immesse in qualche modo dall'esterno.³²

Tutti gli strumenti musicali a fiato (o a vento), meglio noti con il termine tecnico di aerofoni, si classificano in base al tipo di meccanismo che mette in vibrazione l'aria immessa nello strumento, che determina anche parte delle tipiche e riconoscibili caratteristiche sonore dello stesso, come ad esempio il timbro.

Il principio basilare di generazione del suono prevede che una sorgente di aria a flusso continuo con pressione maggiore della pressione atmosferica, come il soffio di una persona o di un mantice, venga trasformata in un flusso oscillante e le sue vibrazioni modulate e amplificate per mezzo di un corpo risonante.³³ Mentre negli strumenti con un foro di insufflazione (fig. 2.1a) o con

³² A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 9.

³³ Il flauto - Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia (<http://fisicaondemusica.unimore.it/Flauto.html>)

un'imboccatura a fischiotto o a becco (fig. 2.1b), come nel caso dei flauti, l'aria viene indirizzata verso un orlo o uno spigolo tagliente e oscilla fra interno ed esterno della cavità creando compressioni e depressioni d'aria all'interno del corpo risonante, questa vibrazione negli strumenti ad ancia e a bocchino è differente.

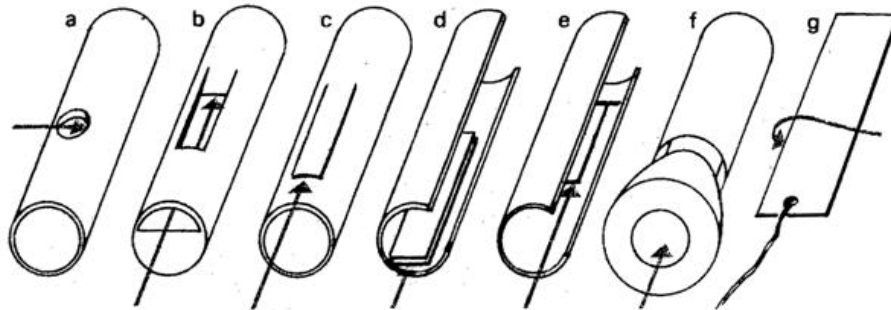


Fig. 2-1. Illustrazione dei tipi di emettitori negli aerofoni³⁴

Nel caso di ancia semplice (fig. 2.1c) o singola, dall'equivalente inglese *single reed*, il flusso d'aria passa per la fessura aperta fra la linguella (flessibile) e il bocchino (rigido)³⁵. Il flusso dell'aria aumenta la propria velocità quando percorre lo stretto passaggio e, per il teorema di Bernoulli (cioè il principio di conservazione dell'energia meccanica nel moto dei fluidi), la sua pressione all'interno del bocchino diminuisce. Conseguentemente l'ancia tende a flettersi verso l'interno dello stesso, fino ad otturare la feritoia di ingresso dell'aria. A flusso interrotto, la velocità dell'aria nel bocchino scende a zero ristabilendo la pressione atmosferica e permettendo all'ancia di tornare verso la sua posizione di equilibrio. A causa della sua elasticità, l'ancia oltrepassa questa posizione e con la feritoia più larga che nella condizione iniziale, il flusso d'aria riprende il passaggio facendo di nuovo scendere la pressione nel bocchino e riportando il sistema nella condizione iniziale. Da questo momento in poi il moto si ripete ciclicamente.³⁶

Il principio di generazione dell'oscillazione nelle ance doppie (fig. 2.1d) è sostanzialmente identico a quello dell'ancia semplice con la differenza che nella seconda la linguetta flessibile oscilla contro un supporto fisso, mentre nella prima si hanno due linguette mobili che oscillano l'una contro l'altra in opposizione di fase. La frequenza di ripetizione del ciclo, o di risonanza dell'ancia,

³⁴ Rielaborazione da The Diagram Group - Musical Instruments of the World: An Illustrated Encyclopedia, 1976.

³⁵ Le ance semplici tradizionali, non più utilizzate negli strumenti moderni quali clarinetto e saxofono sono ancora ampiamente utilizzate nelle zampogne e nelle cornamuse. Differiscono dalle prime in quanto sono costruite interamente (linguetta battente e corpo dell'ancia, equivalente del bocchino per le ance semplici moderne) da un unico tubo di canna.

³⁶ Il clarinetto - Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia

(<http://fisicaondemusica.unimore.it/Clarinetto.html>)

dipende da alcune caratteristiche quali dimensioni, durezza e peso delle linguette battenti, lunghezza e diametro del tubo d'innesto (*staple*, nella terminologia inglese).

Le altre tipologie di generazione dell'oscillazione si possono individuare:

1. negli aerofoni a bocchino, che hanno un meccanismo di generazione più semplice: la vibrazione dell'aria è prodotta direttamente dalle labbra dell'esecutore, estremamente vicine fra loro che, vibrando sotto la spinta del soffio e della pressione sul bocchino, incanalano l'onda di pressione generata direttamente nel tubo risonante;
2. negli aerofoni ad ancia libera, la cui singola linguetta flessibile non è battente e genera una vibrazione d'aria oscillando sull'asse opposto a quello di taglio della piastrina (in genere metallica come nel caso delle armoniche a bocca o delle fisarmoniche) senza mai toccarla;
3. negli aerofoni liberi, la cui oscillazione diretta nell'aria circostante genera la vibrazione della stessa (ad es. il lazo, il rombo, la frusta, ecc.).

L'emettitore rappresenta solamente la prima componente di un sistema più complesso, che individua nel corpo risonante, nei fori applicati su di esso e nell'eventuale campana, gli ulteriori elementi di caratterizzazione dello strumento.

2.1 Il corpo risonante

Il comportamento di un qualsiasi vibratore dipende dalle forze che agiscono tra le sue particelle: le molecole dell'aria, a differenza delle particelle di una corda stazionaria vibrante, le cui vibrazioni seguono l'asse della corda secondo la cosiddetta vibrazione trasversale, si comportano in maniera simile a quella di palline elastiche capaci di esercitare l'una sull'altra spinte frontali, ma non sforzi laterali o di taglio; i movimenti dell'aria in un tubo o in un corno avvengono in direzione parallela alla lunghezza dello strumento, generando moti di vibrazione esclusivamente longitudinale³⁷.

La frequenza del modo di vibrazione inferiore di un corpo risonante è determinata congiuntamente dalla forma e dal volume della cavità, mentre i rapporti di frequenza f_2/f_1 , f_3/f_1 , ecc.,

³⁷ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 9.

dei modi secondari di vibrazione, rispetto al modo fondamentale f_i , sono determinati dalla sola forma³⁸. I modi di vibrazione della cavità non vengono eccitati singolarmente dall'oscillazione dell'ancia (o delle labbra) ma vengono tutti eccitati simultaneamente, in misura dipendente dallo smorzamento esercitato dal corpo su ciascun modo. Non soltanto tutti i modi di vibrazione della cavità sono eccitati dall'aria proveniente dall'ancia, ma tutte queste vibrazioni si ripercuotono sull'ancia stessa in maniera più complessa³⁹. Il corpo risonante, che può selezionare solo alcuni modi di vibrazione, attenuandone alcuni ed enfatizzandone altri, contribuisce, insieme all'emettitore, a caratterizzare il timbro dello strumento. Il controllo esercitato dalla cavità sul meccanismo dell'ancia è spesso talmente forte che alcuni strumenti possono conservare buona parte del loro timbro caratteristico anche quando vengono suonati con emettitori appartenenti a un'altra famiglia di aerofoni⁴⁰.

Avendo l'orecchio la proprietà di preferire naturalmente quei suoni le cui vibrazioni contengono soltanto frequenze parziali che sono multiple intere della fondamentale, tra le cavità di aria vibrante si scelgono (o preferiscono) per la costruzione di strumenti a fiato proprio quei corpi risonanti che hanno questa proprietà⁴¹. Fra le forme che un corpo risonante può avere è possibile identificarne alcune della famiglia delle trombe di Bessel, adatte agli aerofoni ad ancia e in particolare quella cilindrica e quella conica. Infatti, solo queste garantiscono che le frequenze con cui la colonna d'aria tende a vibrare siano multiple intere della frequenza del modo di vibrazione fondamentale.

1. Canna cilindrica: nel caso in cui si assuma che la canna non disperda energia acustica verso l'esterno ma conservi l'onda sonora all'interno del corpo risonante, è possibile stabilire un modello matematico semplificato che approssima bene il criterio di risonanza generale. Essendo, ovviamente, la realtà fisica degli strumenti musicali differente (se non ci fosse emissione di energia lo strumento non suonerebbe), questo modello non rappresenta la totalità dei casi, ma approssima bene il comportamento del modo di frequenza fondamentale⁴², rendendo comprensibili i rapporti fra lunghezza della canna e le frequenze

³⁸ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 17.

³⁹ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 28.

⁴⁰ Una pratica di alcuni musicisti consiste nel sostituire l'emettitore di uno strumento con un altro di differente tipologia, mantenendo così l'intonazione e la diteggiatura originali e cambiando l'approccio di generazione del suono. In particolare si evidenzia l'esistenza di particolari bocchini per oboe che sostituiscono l'ancia doppia con un tipo di ancia semplice che permette facilmente a un clarinetista di suonare l'oboe senza dover necessariamente acquisire familiarità con l'ancia doppia.

⁴¹ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 25.

⁴² Frequenze proprie delle canne - Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia (http://fisicaonemusica.unimore.it/Frequenze_proprie_delle_canne.html)

di risonanza anche nel caso delle zampogne. I modelli matematici in questione sono quelli che esprimono le frequenze di risonanza di una canna cilindrica aperta ad entrambe le estremità e di una canna cilindrica chiusa per una parte, rapportandole alla lunghezza della stessa.

Nel primo caso la frequenza di risonanza fondamentale è espressa come:

$$f_1 = c / (2L) \quad (2.1)$$

mentre le frequenze successive sono multipli interi della frequenza fondamentale:

$$f_n = n * f_1 \quad (2.2)$$

essendo c la velocità del suono (approssimativamente 350 m/s, ipotizzando aria calda e umida, come quella del fiato di un musicista) e L la lunghezza del tubo sonoro.

Nel secondo caso la frequenza di risonanza fondamentale è espressa come:

$$f_1 = c / (4L) \quad (2.3)$$

con le frequenze successive, multipli interi dispari della frequenza fondamentale:

$$f_n = (2n + 1) * f_1 \quad (2.4)$$

Il primo caso rappresenta il corpo risonante del flauto, aperto per entrambe le estremità mentre il secondo quello del clarinetto, cilindrico per gran parte della sua lunghezza, che viene considerato chiuso ad un estremo agli effetti dell'acustica.

2. Canna conica: il modello matematico di una canna conica con un'estremità chiusa è assimilabile a quello di una canna cilindrica completamente aperta⁴³. In questo modo la frequenza di risonanza fondamentale può essere espressa come:

$$f_1 = c / (2L) \quad (2.5)$$

e le frequenze successive sono multipli interi (pari e dispari) della frequenza fondamentale:

$$f_n = n * f_1 \quad (2.6)$$

Le relazioni sopraccitate risultano evidenti quando si confronta l'estensione dei clarinetti con quella dei flauti o degli oboi, che fanno riferimento all'ultimo caso e in particolare alle formule 2.5 e 2.6. Nonostante questi tutti questi strumenti abbiano all'incirca la stessa lunghezza, il registro del clarinetto si estende un'ottava sotto quello del flauto e dell'oboe. Nei secondi mezza lunghezza

⁴³ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 90.

d'onda si trova all'interno dello strumento, mentre il clarinetto ne contiene solo un quarto.⁴⁴ Il comportamento delle canne sonore di zampogna non fa eccezione: il chanter destro di una zampogna a chiave è approssimativamente lungo il doppio di quello montato su una surdulina della stessa tonalità.

2.2 I fori e il padiglione nei legni

La funzione principale dei fori digitali o di sfiato (alcuni fori presenti sugli strumenti non sono indicati per la digitazione ma servono solamente per regolare l'intonazione di base) è quella di ridurre in maniera regolare e definita la lunghezza effettiva del corpo risonante, permettendo così un immediato cambiamento della lunghezza dell'onda stazionaria generata all'interno di questo. La variazione di detto parametro riduce il tempo necessario affinché l'aria compressa al suo interno si rifletta all'estremità e torni all'origine, alterando la frequenza fondamentale del tono generato dallo strumento e dando la possibilità di eseguire più note senza variare il modo di vibrazione dell'oscillazione originaria (come invece succede per le trombe con o senza pistoni o nel caso del flauto armonico⁴⁵). La grandezza e la posizione di un foro influiscono sul cambio di lunghezza effettiva del tubo vibrante nel modo illustrato in figura 2.3. La lunghezza equivalente L_e è sempre compresa tra la lunghezza del tubo L e la distanza D tra l'estremità chiusa e il foro. Un foro di dimensioni modeste comporta una riduzione contenuta della lunghezza L_e mentre un foro maggiore (ad esempio del diametro della sezione interna del tubo) riduce L_e approssimativamente alla lunghezza D , quindi alla lunghezza equivalente di un tubo troncato all'altezza del foro. Nonostante la lunghezza equivalente del corpo risonante forato si riduca, vi sarà una differenza nella risposta in frequenza, rispetto a quella di un corpo di lunghezza equivalente ma troncato (quindi non forato).⁴⁶

Per spiegare l'effetto acustico dei fori negli strumenti a fiato occorre rifarsi al concetto di impedenza acustica di una canna. Questa è la proprietà che descrive la relazione tra la velocità del flusso d'aria all'interno della canna e la pressione acustica risultante. Considerata nel dominio della

⁴⁴ Il clarinetto - Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia
(<http://fisicaondemusica.unimore.it/Clarinetto.html>)

⁴⁵ Questo tipo di strumento non è dotato di fori ma ha comunque la capacità di variare l'altezza delle note secondo una precisa sequenza che risponde al criterio degli armonici, cioè i modi secondari di vibrazione della canna. L'esecutore riesce così ad ottenere un numero sufficiente di note differenti variando semplicemente la pressione d'aria esercitata sull'imboccatura dello strumento.

⁴⁶ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 69-70.

frequenza, l'impedenza permette la rappresentazione della risonanza dello strumento, cioè dell'insieme delle frequenze enfatizzate o attenuate.⁴⁷

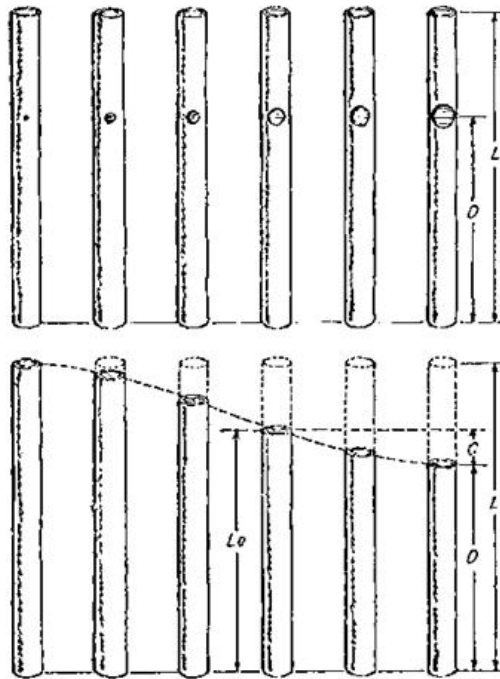


Fig. 2-2. Alcuni esempi dell'effetto di un foro sulla variazione della lunghezza equivalente di una canna sonora⁴⁸.

Come riferito, negli strumenti musicali reali non si ha la totale riflessione dell'onda all'estremità del corpo risonante, ma parte di questa viene ceduta dalla canna all'ambiente; anzi è proprio questa parte che viene poi irraggiata nello spazio circostante e che si percepisce come il suono proveniente dallo strumento. Il passaggio da una vibrazione confinata ad una libera, tuttavia, può essere complesso e ai bordi della canna i fronti d'onda possono subire diffrazione. L'irraggiamento di onde sonore nell'ambiente è favorito quando la canna è di grande diametro perché la sua impedenza (minore rispetto a quella di una canna di diametro inferiore) permette di approssimare meglio i fronti d'onda piani all'estremità della canna a quelli sferici che si hanno nell'aria aperta e, quindi, si adatta meglio all'impedenza di radiazione propria dell'aria.⁴⁹ In considerazione che la prerogativa di uno strumento musicale è quella di permettere il trasferimento dell'energia sonora all'esterno e nel modo più vantaggioso possibile, occorre introdurre un

⁴⁷ Canna cilindrica modificata - Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia (http://fisicaondemusica.unimore.it/Canna_cilindrica_modificata.html)

⁴⁸ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 69.

⁴⁹ Canna cilindrica - Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia (http://fisicaondemusica.unimore.it/Canna_cilindrica.html)

meccanismo di adattamento di impedenza del corpo risonante che permetta, a pari energia introdotta, la massimizzazione dell'irraggiamento.

Nei legni, a differenza di quanto succede per gli ottoni, l'apertura di uno o più fori modifica il tipo di irraggiamento dello strumento in quanto una parte dell'energia emessa viene irradiata proprio dai primi fori aperti. Il diametro dei fori è generalmente molto ridotto e, quindi, teoricamente inadatto ai fini dell'irraggiamento. Nella realtà questa caratteristica è relativa esclusivamente ad alcune frequenze infatti le componenti corrispondenti alle prime armoniche della nota suonata vengono emesse dai primi fori mentre le alte frequenze “sfuggono” e vengono irradiate molto efficacemente da tutti i fori inferiori, fino al termine della canna.⁵⁰ Pertanto i fori nel complesso costituiscono uno degli elementi di adattamento dell'impedenza in un corpo risonante e la successione di molti fori aperti sulla canna innesca, dal punto di vista acustico, un effetto di tipo HPF (filtro passa-alto). Come per i fori, il ruolo di una campana (o padiglione) montata all'estremità della canna è strettamente connesso a quello di adattatore di impedenza. Diversamente da quanto succede nel caso dei fori, questa agisce incrementando gradualmente il diametro del corpo risonante evitando l'effetto di una brusca interruzione del tubo e massimizzando l'efficienza dell'irraggiamento. Essa, inoltre, presenta una seconda proprietà strettamente correlata con la prima e utile ai fini dell'acustica. La presenza di un padiglione modifica infatti la risposta in frequenza della canna generando un effetto di tipo passa-alto riconducibile al caso dei fori di sfiato⁵¹. Questo effetto è più evidente in prossimità delle note gravi dello strumento⁵² e dipende dalle dimensioni della campana e in particolare dalla sua lunghezza e svasatura. La presenza della campana nei legni è quindi doppiamente giustificata dalla necessità di modificare il timbro delle note più gravi, conferendo a queste ultime le caratteristiche tipiche dello strumento; e dalla necessità di amplificazione del suono, che ne rende possibile la percezione a grandi distanze.

2.3 Il registro e gli effetti di abbellimento

Negli aerofoni ad ancia (doppia e/o semplice) e in quelli di tipo a fischiello o a becco è possibile alterare il modo di vibrazione principale dell'emettitore tramite opportune tecniche al fine di ottenere un cambio di registro, quindi di ottava. Nel caso degli strumenti ad ancia questo cambio è ottenibile tramite un'impostazione differente delle labbra sull'ancia o sul bocchino, mentre negli

⁵⁰ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 93

⁵¹ A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato, 1966, p. 94

⁵² Si fa riferimento in particolare alle note più gravi su ogni registro, cioè quelle che trovano lo “sfiato” in prossimità della campana.

strumenti a becco tramite l'emissione maggiore di aria una differente canalizzazione dell'aria sul foro di insufflazione. In linea di massima, soprattutto per gli strumenti moderni, il cambio di registro è più semplice tramite apposite chiavi, che aprono fori in posizioni specifiche in modo da forzare i nodi dell'onda stazionaria equivalente nel corpo e indurre automaticamente l'emettitore a vibrare secondo modi superiori a quello fondamentale.

Oltre alla normale esecuzione delle note, gli strumenti musicali, e in particolare gli aerofoni ad ancia, possono eseguire alcuni effetti o abbellimenti caratteristici tra i quali:

- Vibrato: è la variazione periodica dell'altezza in termini di intonazione (o *pitch*) della nota eseguita. Questo tipo di abbellimento, che risulta utile soprattutto nei casi in cui le note suonate vengano sostenute per più tempo, corrisponde ad una modulazione in frequenza della nota suonata. Affinché sia musicalmente efficace deve avere, però, basse frequenze di modulazione. Negli aerofoni ad ancia si ottiene tramite la variazione della pressione delle labbra o dei denti sulle linguette vibranti (nel caso di ancia doppia) o sulla linguetta e il bocchino (nel caso di ancia semplice).
- Tremolo: è la variazione periodica dell'intensità sonora della nota eseguita. Come nel caso precedente, anche per il tremolo valgono il principio di modulazione (in questo caso di ampiezza) e l'utilità (abbellimento di note lunghe e sostenute). Negli aerofoni ad ancia o a insufflazione il tremolo è facilmente ottenibile variando periodicamente l'emissione dell'aria; tuttavia va sottolineato che esso è un effetto difficile da ottenere in maniera del tutto indipendente dal vibrato in quanto il principio di generazione delle vibrazioni negli strumenti ad ancia, così come in quelli a becco o insufflazione, implica una correlazione fra l'intensità dell'aria e la frequenza ottenuta. La diminuzione della pressione d'aria immessa nello strumento comporta infatti un'alterazione, seppur minima, anche sull'altezza della nota eseguita.
- Glissato/glissando: è la variazione graduata, più o meno rapida, dell'altezza in termini di intonazione della nota eseguita. Non essendo possibile negli strumenti ad ancia eseguire questo incremento in modo ampio (ad esempio oltre un semitono) e controllato agendo semplicemente sull'emettitore, si ottiene tramite l'occlusione graduale dei fori digitali, nei casi in cui lo strumento lo permetta⁵³.

⁵³ Alcuni fori degli strumenti ad ancia più moderni come sassofoni e oboi e alcuni flauti sono azionati esclusivamente da chiavi e non danno la possibilità di essere occlusi parzialmente.

2.4 Il funzionamento della zampogna

Dopo l'analisi del ruolo dei singoli componenti di un aerofono generico, è necessaria quella relativa agli elementi che caratterizzano gli aerofoni a sacco, per comprenderne le dinamiche di funzionamento, le differenze rispetto agli strumenti di riferimento (clarinetti e oboi) e le implicazioni introdotte dall'insufflazione indiretta, sia dal punto di vista dell'esecuzione sia da quello del suono generato. Un'ultima sezione, infine, descriverà il tipo di approccio del suonatore con il suo strumento ed i procedimenti necessari per l'intonazione delle note.

2.4.1 Le ance

L'ancia è la componente più sensibile e delicata della zampogna; se resta inoperosa per molto tempo, sarà necessario prendere alcuni accorgimenti perché ritorni a emettere il suono⁵⁴

Come già indicato nella parte introduttiva, le ance sono associabili a dispositivi a valvola il cui andamento alternato in chiusura e in apertura attua una serie periodica di rarefazioni e compressioni dell'aria. Esse costituiscono gli emettitori delle vibrazioni nello strumento e, a causa della loro struttura, caratterizzano il suono conferendogli forte intensità e timbro penetrante⁵⁵. Anche dal punto di vista storico, costituiscono la parte più significativa negli aerofoni a sacco in quanto hanno naturalmente influenzato la stessa dinamica evolutiva degli strumenti appartenenti a questa categoria, selezionando le canne risonanti che maggiormente si adattavano al loro comportamento⁵⁶. Per le zampogne centro-meridionali è possibile identificare nell'ancia semplice e in quella doppia i due fondamentali meccanismi di generazione della vibrazione. Tuttavia, nonostante i principi fisici di base comuni, le forme, la realizzazione e le risposte in frequenza delle ance utilizzate sulle zampogne si discostano anche di molto da quelle utilizzate nei più moderni aerofoni ad ancia.

⁵⁴ N. Scaldaferrì, M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia, 2005. pag. 63

⁵⁵ F. Guizzi – Guida alla musica popolare in Italia; Gli strumenti, p. 141.

⁵⁶ Nonostante le numerose eccezioni, in linea generale si può riconoscere una tendenza naturale all'accoppiamento di una tubo risonante di forma cilindrica per le ance semplici e di una canna tronco-conica per le ance doppie.

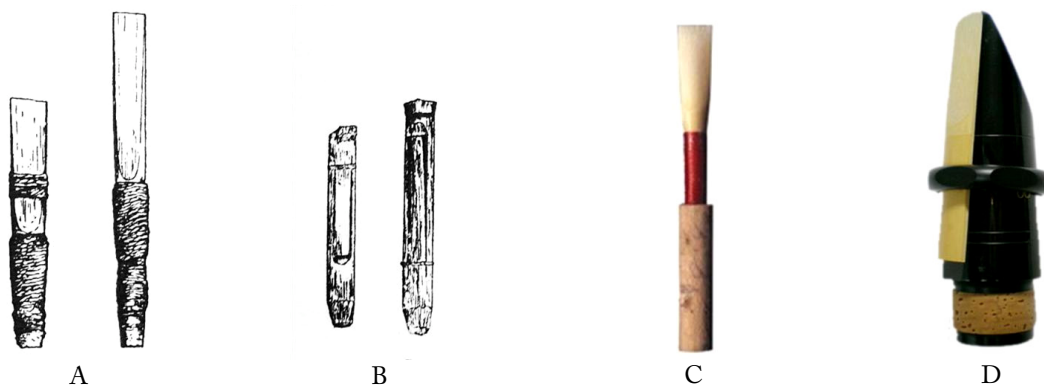


Fig. 2-2. Ance doppie (a) e semplici (b) di zampogna a confronto con l'ancia doppia nell'oboe (c) e l'ancia semplice nel clarinetto (d)

Le ance utilizzate nelle zampogne italiane si ricavano da sezioni di canna comune (*Arundo donax Linneaus*), raccolte preferibilmente nelle località marittime, ma non necessariamente nei pressi delle zone umide, affinché le nervature della pianta siano più fitte e i suoi pori più piccoli⁵⁷. Vengono lasciate stagionare per periodi di tempo variabili, normalmente dai quattro mesi ai due anni. Lunghezza e sezione della canna sono variabili a seconda delle dimensioni e della tipologia della cavità risonante a cui devono essere accoppiate. L'ancia semplice battente, di più facile e intuitiva costruzione, si realizza tramite un taglio che può essere discendente (superiore) ovvero ascendente (inferiore), a seconda della sua direzione nei confronti del nodo (la parte chiusa) della canna. La parte vibrante può essere soggetta a una scorticatura più o meno consistente, che incide sul peso e sulla durezza della stessa, facilitando la soglia di pressione d'aria necessaria ad "attivare" il suo moto⁵⁸. La natura dell'ancia semplice tradizionale, costruita tutta dalla stessa sezione di canna cilindrica, differisce nettamente da quella a singola linguetta vibrante più bocchino dei legni moderni ad ancia semplice.

Le ance doppie per zampogna sono ricavate dall'accoppiamento di due linguette vibranti, ricavate da una sezione di canna comune tagliata longitudinalmente in più parti (due o tre) e successivamente ripiegata su se stessa e ripulita accuratamente, legate per una buona metà della loro lunghezza, per mezzo di spago impeciato, a un tubo di diametro molto ridotto (4-6 mm). Le ance doppie utilizzate nelle zampogne centro-meridionali hanno caratteristiche simili⁵⁹ fra loro ma, come

⁵⁷ F. Guizzi – Guida alla musica popolare in Italia; Gli strumenti, p. 157.

⁵⁸ In questo senso, il suonatore e costruttore di zampogne Giuseppe Salamone di Terranova di Pollino (PZ) sostiene che un'ancia con la parte vibrante scorticata conferisce un volume più alto e un timbro più squillante allo strumento, rispetto all'ancia equivalente non sottoposta a scorticatura della linguetta. Tuttavia questo procedimento rischia di indurre più instabilità nell'ancia che, perdendo il suo rivestimento originale, è più soggetta all'assorbimento dell'umidità.

⁵⁹ Con l'unica eccezione riferita alla sezione dei tubicini (*staple*, in inglese) che può variare da modello a modello e/o da regione a regione, in funzione dell'adattamento necessario ai particolari tipi di cavità risonante.

succede per le ance semplici, possono discostarsi anche di molto da quelle utilizzate negli strumenti moderni come l'oboe ed il fagotto. In linea generale, le dimensioni (in particolare la lunghezza) dell'ancia sono proporzionate al corpo risonante a cui vengono accoppiate; la natura imperfetta e irregolare delle canne sonore di una zampogna, unita alla sua ridotta estensione melodica, permette l'utilizzo di ance di dimensione, forma e durezza anche molto diverse fra loro con risultati apparentemente simili. Le loro dimensioni variano da costruttore a costruttore e, pertanto, è praticamente impossibile identificare un unico criterio standard di realizzazione e una loro rappresentazione matematica ben definita. La parte vibrante di ogni linguetta, più estesa e grossolana rispetto al suo equivalente nell'oboe, oltre a possedere un timbro differente, implica alcune importanti limitazioni nella tecnica esecutiva. Come riscontrato anche nel caso dell'oboe popolare greco *zournas*⁶⁰, la gamma dinamica nei termini dell'intensità sonora emessa dagli strumenti appartenenti a questa famiglia è fortemente limitata. In considerazione che anche una lieve variazione della pressione d'aria immessa comporta l'alterazione più o meno consistente dell'altezza tonale dello strumento, è intuitivo comprendere che questo tipo di ancia non offre gamma dinamica di intensità realmente utilizzabile ai fini dell'esecuzione sullo strumento, a differenza di quanto invece avviene per l'oboe.

2.4.2 La funzione del sacco

Le zampogne italiane montano un sacco per la riserva dell'aria, che viene ricavato da pelle animale trattata (in genere di capra o di capretto, più raramente di vacca) oppure, più recentemente, costituito da materiali non naturali quali gomma o *wintex*⁶¹. Come già anticipato, il sacco, o meglio definito "otre", viene interposto tra la bocca del suonatore e le ance dello strumento che, quindi, si caratterizza per l'insufflazione indiretta dell'aria. Il suo utilizzo è necessario per gestire contemporaneamente la pressione dell'aria all'interno delle canne sonore in modo svincolato dall'insufflazione del suonatore, consentendo allo stesso di recuperare il fiato in maniera naturale ma soprattutto indipendente dall'esecuzione. Fino all'introduzione dell'otre, gli aerofoni potevano emettere continuamente il suono esclusivamente per mezzo di tecniche di respirazione ciclica, o circolare, sfruttando il volume d'aria contenuto nelle guance gonfie del suonatore, utilizzate come

⁶⁰ P. Tzevelekos, G. Kouroupetroglou - Acoustical analysis of woodwind musical instruments for virtual instrument implementation by physical modeling, 2004.

⁶¹ I tessuti sintetici composti come il *wintex* e il *goretex* stanno pian piano soppiantando l'uso dell'otre di gomma, introdotto nel centro Italia una cinquantina di anni fa, in virtù del fatto che non creano una condensa di vapore acqueo internamente all'otre, che risulterebbe rovinosa per la conservazione dello strumento.

serbatoio. Le dimensioni e la forma dell'otre sono variabili; tuttavia non influiscono sul meccanismo di funzionamento dello strumento ma solo sul suo posizionamento rispetto a braccia e corpo del suonatore⁶². Le misure del sacco non sono in genere proporzionali alla grandezza dello strumento; al contrario, si tende a preferire l'accoppiamento di otri grandi per strumenti di piccola taglia e viceversa⁶³.

L'uso dell'otre negli aerofoni a sacco, conferisce a questa famiglia di strumenti musicali la tipica caratteristica dell'emissione ininterrotta, ma implica alcune naturali e importanti limitazioni meno ovvie. In linea generale la tecnica di utilizzazione del sacco accomuna tutti gli strumenti della famiglia e impone che la pressione d'aria sviluppata all'interno delle singole canne sonore rimanga quanto più costante possibile. La variazione di pressione all'interno delle canne sonore genera comportamenti differenti a seconda del tipo di ancia, ma nella quasi totalità dei casi si traduce in un aumento o in una diminuzione della sola altezza in termini di intonazione della canna sonora, in linea con il comportamento degli aerofoni generici. Si sfata così il mito di chi, ignaro, crede che una minore pressione dell'aria corrisponda anche a una diminuzione dell'intensità del suono. La maggior parte degli aerofoni a sacco (e in particolare le zampogne italiane) presentano nello stesso modello numerose canne sonore, tra loro anche molto differenti in termini di tipologia, dimensioni ed emettitori (il principio di generazione del suono differisce nel caso di strumenti ad ancia miste). Detta condizione suggerisce che la variazione anche leggera della pressione dell'aria avrebbe risvolti differenti su ogni ancia e comporterebbe l'effetto indesiderato di una "scordatura" complessiva di tutto lo strumento (che non risulterebbe stonato solamente rispetto ad altri strumenti, ma anche rispetto a se stesso!). Il comportamento appena descritto è in realtà caratteristico e rappresentativo della categoria e si presenta in modo più o meno evidente all'inizio e alla fine di un'esecuzione⁶⁴ ma mai durante.

L'uso dell'otre implica ancora l'impossibilità di eseguire il vibrato con la tecnica degli altri aerofoni (cioè tramite pressione delle labbra sull'ancia); questo effetto musicale, pertanto, viene ottenuto sugli strumenti a sacco tramite l'occlusione parziale o totale dei fori secondari dello strumento, ossia di quei fori digitali più lontani dal primo foro aperto, che determina l'altezza della nota. In questo modo si altera nettamente (a differenza degli altri strumenti ad ancia dove il

⁶² La pressione dell'otre può essere gestita dall'avambraccio, da entrambe le braccia o dallo strumento che viene tirato contro il corpo a seconda del tipo di otre, delle sue dimensioni e delle preferenze soggettive dei suonatori.

⁶³ Come sostiene Gigi Rizzo, suonatore e costruttore di zampogne di Monopoli (BA).

⁶⁴ Quello che, in accordo con Guizzi, viene denominata "animazione" delle canne sonore, altro non è che l'effetto dell'iniziale emissione sonora delle canne in fase di riempimento dell'otre che, non fornendo una pressione d'aria sufficiente (equivalente alla pressione a regime, cioè in fase di esecuzione), comporta una variazione irregolare di intonazione sulle canne.

movimento delle labbra comporta una variazione graduata) l'altezza della nota da pochi centesimi di tono fino anche a un semitono.

Come sopra rappresentato, l'estensione melodica delle canne del canto nelle zampogne italiane è limitata alle dita della singola mano; è facile intuire che per questi strumenti non sia possibile cambiare registro come accade per gli altri aerofoni, che incrementano così l'estensione delle note alle ottave successive. Non è il caso delle cornamuse europee che, al contrario, hanno la possibilità di raggiungere l'ottavo ed il nono grado della scala di appartenenza tramite l'ausilio del foro portavoce. Alcuni particolari modelli, inoltre, possono estendersi fino all'intera ottava successiva, ma solo tramite l'ausilio di una pressione maggiore esercitata sull'otre⁶⁵, pratica invece non prevista nelle zampogne italiane.

2.4.3 Come si utilizza

Rispetto a tanti altri strumenti a fiato, la zampogna non è uno strumento oggettivamente molto complesso da suonare; richiede una buona dose di pratica in relazione alla quantità d'aria necessaria per innescare la vibrazione delle ance e al mantenimento di una pressione costante sull'otre. La diteggiatura e la scala musicale rimangono decisamente intuitive mentre risulta difficile la sua manutenzione. Essendo costruita con materiali naturali (legni, ricavati da piante da frutto, otri in pelle, ance in fibra vegetale, ecc.) fortemente igroscopici e non sempre trattati con procedimenti di impermeabilizzazione, è fortemente soggetta alle condizioni atmosferiche locali ed in particolare ai tassi di umidità contenuta nell'aria. Alcuni modelli più di altri, hanno il grande difetto di mantenere l'accordatura solo in condizioni di temperatura e di umidità stabili. Questa caratteristica è in realtà propria di tutti gli strumenti a sacco in quanto, come riferito, l'insufflazione indiretta dell'aria non offre la possibilità di variare il comportamento dell'ancia (il responsabile reale dell'accordatura) direttamente con le labbra; tuttavia riscontriamo nelle zampogne una dipendenza dal fenomeno più vistosa rispetto alle altre cornamuse. Questo è dovuto alla presenza di due chanter, dalle dimensioni anche molto differenti ma che necessitano un'intonazione perfetta in "unisono", che richiedono un processo di intonazione più complesso rispetto a quello dei bordoni e sono più soggetti alle variazioni climatiche, per via della presenza dei fori.

La correzione dell'intonazione nei chanter di zampogna è effettuata ostruendo parzialmente i fori di sfiato e i fori digitali per mezzo di cera d'api. Il fenomeno per cui alcuni modelli di zampogna presentano fori digitali più larghi del dovuto suggerisce che la costruzione degli aerofoni

⁶⁵ Alcuni suonatori di cornamusa, in queste situazioni, optano per zittire i bordoni, che altrimenti suonerebbero stonati.

a sacco tradizionali non rispetta sempre progetti basati su calcoli ben definiti ma varia, anche di molto, da caso a caso. Su uno stesso modello di zampogna può essere operata, con la tecnica sopra citata, una correzione di intonazione che ne varia la scala da pochi centesimi di tono fino anche un paio di toni (generalmente non più di un tono al di sopra o al di sotto della tonalità nativa dello strumento), pertanto, detto procedimento non assume la funzione di “correzione” temporanea dell’intonazione delle note ma diventa essenziale al fine della definizione della tonalità stessa dello strumento.

Capitolo 3

Sviluppo di un modello

Il progetto sperimentale che si vuole sviluppare prevede l'ideazione e la realizzazione di un nuovo strumento musicale elettronico, in forma di prototipo, che riprende le caratteristiche delle zampogne meridionali. Il progetto nasce dalla volontà di unificare le molteplici caratteristiche delle zampogne in un unico sistema che offra da una parte la possibilità di essere suonato come uno strumento vero, conservando le caratteristiche dell'usabilità originale e dall'altra la possibilità di ottenere un suono realistico, generato per mezzo di sintesi digitale.

Immediatamente si comprende l'importanza della scissione del progetto in due sezioni distinte, che possono essere considerate indipendenti l'una dall'altra. I due livelli di implementazione dello strumento sono così divisi:

1. Interfaccia: viene progettata e realizzata un'interfaccia (*hardware*) di controllo elettronica che rileva i movimenti del musicista sullo strumento, li interpreta, li trasforma e sulla base di alcuni parametri dettati da un protocollo standard di comunicazione, li invia codificati a un programma di sintesi sonora.
2. Sintetizzatore: progettazione e realizzazione di un programma (*software*) che permetta al musicista di selezionare un tipo particolare di zampogna, impostarne la tonalità, la scala e il tipo di temperamento. Il metodo di sintesi del suono si fonda su un particolare algoritmo che, sulla base di alcuni parametri prestabiliti e memorizzati nel programma e in relazione ai segnali in *input*, riferiti alle note suonate, genera una sequenza di valori che rappresentano il segnale audio in formato digitale.

Nonostante risulti possibile sviluppare tale progetto implementando un unico sistema *stand-alone*, cioè completo, che integra nello stesso apparato fisico, tutti i moduli che lo costituiscono, può risultare più indicato progettare e sviluppare i due livelli su due apparati distinti, ognuno specializzato in un compito differente⁶⁶. Questo tipo di approccio garantisce a entrambe le parti di poter essere sviluppate nel miglior modo possibile, senza soffrire delle limitazioni imposte da un'eventuale adattamento a una piattaforma sfavorevole⁶⁷. Nella valutazione delle tecniche/tecnologie da utilizzare, per entrambi i livelli, occorre recuperare e analizzare le informazioni che riguardano il funzionamento delle zampogne e generare dei modelli per interfaccia e programma di sintesi che ne approssimino e semplifichino il criterio di funzionamento.

3.1 Il modello per l'interfaccia

L'implementazione di un'interfaccia di controllo elettronica può svincolare il controllo dell'esecuzione dall'energia richiesta per la generazione del suono⁶⁸, mantenendo le caratteristiche originali dello strumento che può essere facilmente utilizzato da un utente che ne abbia pratica o da un appassionato non ancora capace di eseguire virtuosismi⁶⁹. Naturalmente, il passaggio da uno strumento acustico ad uno elettronico implica dei lati negativi come l'ovvia riduzione delle sensazioni associate alla produzione diretta del suono⁷⁰ (basti pensare alla sensazione tattile delle dita percepita a seguito delle vibrazioni delle canne sonore di un aerofono) e la perdita di alcuni comportamenti dello strumento, esclusi dal modello per via dell'approssimazione e la "quantizzazione" dei parametri di funzionamento.

L'implementazione di un'interfaccia elettronica dà, inoltre, la possibilità di modificare i normali criteri di controllo dello strumento originale, permettendo così l'esplorazione e la sperimentazione di nuove funzionalità, come ad esempio quelle ottenute attraverso la gestione di sensori, chiavi o controlli aggiuntivi che offrono nuove prospettive (per es. il meccanismo di *octave shift* nelle interfacce che imitano gli strumenti a fiato) oppure ovviano alle limitatezze proprie dello

⁶⁶ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004.

⁶⁷ Si pensi allo sviluppo di un algoritmo di sintesi su piattaforma di *physical computing*, sicuramente possibile ma notevolmente più complesso e subordinato alle risorse disponibili, in genere insufficienti.

⁶⁸ C. Roads - The computer music tutorial, 1996. p. 620

⁶⁹ Nel caso delle zampogna, in considerazione della particolarità e difficoltà di esecuzione, il suo acquisto è spesso seguito dall'abbandono della pratica. La causa risiede anche nei limiti tecnici propri dello strumento, come ad esempio la necessità di costante accordatura o la manutenzione delle ane e dell'otre, che in quanto naturali, sono soggetti a usura.

⁷⁰ C. Roads - The computer music tutorial, 1996. p. 620

strumento originario (per es. le ridotte possibilità di cromatismi per via di una diteggiatura tradizionale⁷¹). Per contro, la scelta di innovazione può comportare alcuni svantaggi per l'esecutore esperto, che non avrebbe possibilità di sfruttare le conoscenze e le abilità in suo possesso, ma dovrebbe adattarsi a un nuovo tipo di approccio.

Nel caso di questo progetto, si è scelto di sviluppare un modello di interfaccia dalle caratteristiche riconoscibili per un suonatore tradizionale; questa scelta è motivata da più considerazioni. La gestione di tre linee melodiche (come già visto precedentemente, l'introduzione del sistema a bordone melodico introduce nuove possibilità armoniche sullo strumento ma richiede il controllo di un'ulteriore canna sonora) con la tecnica del suono continuo è difficoltosa sulle comuni piattaforme esistenti. Fra le interfacce di controllo polifoniche, cioè quelle che permettono la gestione di più linee melodiche, si annoverano le comuni tastiere elettroniche che però, secondo il criterio originale di funzionamento, richiedono il mantenimento fisico del tasto come vincolo per un suono continuo e non permettono la sovrapposizione di più note alla stessa altezza in termini di *pitch*⁷². Una seconda motivazione può essere individuata nell'originalità dell'approccio musicale della zampogna (soprattutto quella modificata) che non ha eguali in tutto il panorama degli strumenti musicali esistenti⁷³ e per questo rappresenta la base di una possibile nuova e interessante interfaccia di controllo il cui utilizzo non sarebbe confinato al progetto o all'accoppiamento di un algoritmo di sintesi definito, ma potrebbe potenzialmente estendersi all'intero campo della *computer music*. La necessità di un controller fortemente rispettoso delle caratteristiche originali dello strumento diventa pertanto essenziale.

Sulla base dello studio del funzionamento delle zampogne italiane (si veda cap.2) è possibile definire i parametri chiave da implementare nell'interfaccia affinché questa sia in grado di generare segnali di controllo validi e che rispecchino i movimenti dell'utente nel sistema. Come analizzato in precedenza, le componenti che permettono al musicista di modulare il suono nell'esecuzione di un brano musicale sono esclusivamente due:

⁷¹ Come si è visto, le diteggiature degli strumenti a fiato tradizionali richiedono l'impostazione delle dita "a forchetta", che può risultare difficoltosa in un'esecuzione di tipo virtuosistico.

⁷² Nella realtà, alcuni controller offrono la possibilità di assegnare canali e comportamenti differenti a gruppi di tasti, permettendo praticamente l'esecuzione di più note identiche. Inoltre, per svincolare l'esecuzione delle note dal mantenimento del tasto, sarebbe possibile sviluppare un modulo di trasformazione dei messaggi di controllo, che si frappone fra la tastiera elettronica e il programma di sintesi e garantisce l'esecuzione continua delle note.

⁷³ F.Guizzi, R.Leydi – Le zampogne in Italia, 1985.

1. i fori digitali;
2. la pressione d'aria esercitata dall'otre sul blocco di innesto delle canne.

Tutti i modelli di zampogna presi in considerazione hanno come minimo quattro fori digitali sul chanter sinistro e quattro sul destro. Entrambe le canne, inoltre, possono presentare più fori di sfiato (per l'intonazione). L'uso di questi fori secondari non influisce sull'esecuzione per cui la loro rappresentazione è del tutto trascurabile. I quattro fori digitali presenti sulla canna manca sono comuni a tutti i tipi di zampogna, con l'unica possibile differenza della loro posizione (va evidenziato che nel modello "a chiave" l'accessibilità al foro inferiore è vincolato all'utilizzo della chiave, rappresentata invece in questo progetto come un foro digitale). Considerando la posizione dei fori presenti sulla canna sinistra della zampogna zoppa del centro Italia come il giusto compromesso fra la quelli della zampogna a chiave e della surdulina, si è deciso di implementare detta canna (o chanter) sul modello di questa zampogna. Per la canna destra del canto valgono le seguenti differenti considerazioni: i modelli della zampogna zoppa e di quella a chiave campano-lucana presentano quattro fori anteriori, di cui il più basso non in linea con gli altri, e un foro posteriore posto in alto. Nella surdulina, invece, non è presente il foro posteriore e l'uso dei fori risulta scalato di una posizione. Inoltre, i modelli di zampogne a chiave moderne, riportano un quinto foro frontale, da occludere con il mignolo, e di un foro laterale superiore, azionato per mezzo di chiave.

La scelta operata è quella di implementare un modello di chanter destro completo, con sette fori (cinque fori frontali, uno posteriore e uno superiore posizionato lateralmente). Nel caso di utilizzo dell'interfaccia in una modalità che non preveda l'uso di alcuni fori, che possono ritenersi aggiuntivi rispetto ai modelli classici, la loro funzione verrà implementata in modo differente, conferendo allo strumento nuove possibilità, senza modificare il criterio di base originale. Con la stessa considerazione vengono trattati i fori sul bordone posteriore, presenti esclusivamente in alcuni tipi di zampogne moderne. Nel modello dell'interfaccia che si è voluto sviluppare essi sono presenti nel numero di tre.

La scelta di un insieme di diteggiature coerenti con gli "standard"⁷⁴ popolari, è dettata dalla esigenza di rispettarne la tradizione. Pertanto, l'implementazione di fori digitali "doppi" o chiavi aggiuntive corrispondenti alle alterazioni della scala è stata scartata. È stato, però, conservato il

⁷⁴ Nel caso delle zampogne italiane, risulta difficile individuare un vero e proprio standard di diteggiatura, in quanto la stessa può cambiare da una regione geografica a un'altra o, addirittura, da suonatore a suonatore. Tuttavia alcune diteggiature risultano tanto ricorrenti da poter essere considerate "standard".

sistema di accesso a dette alterazioni, così come l'implementazione del vibrato, per mezzo di alcune configurazioni di occlusione dei fori particolari (ad esempio quella che nel gergo degli strumenti a fiato viene chiamata diteggiatura a "forchetta"), che rendono i risultati ottenuti coerenti e compatibili ai comportamenti reali degli strumenti presi in considerazione.

Un altro fattore importante da considerare nel modello dell'interfaccia riguarda la rappresentazione del comportamento dei fori digitali. È noto che il funzionamento dei fori digitali della zampogna non differisce da quello di un altro qualunque strumento a sacco o a fiato generico; pertanto l'occlusione può essere totale o parziale. Tuttavia, per il caso specifico della zampogna, risulta possibile effettuare un'approssimazione del comportamento dei fori, limitando il rilevamento dell'occlusione a due stati (aperto/chiuso). Detta semplificazione è motivata dalla considerazione dell'esecuzioni tradizionali. Sugli esemplari di aerofono a singolo chanter, come le cornamuse, l'esecuzione è strettamente monodica; infatti le dita di entrambe le mani del suonatore sono impegnate nell'esecuzione di un'unica melodia. In questi casi vengono adottate le più raffinate tecniche di abbellimento musicale oggi in uso. Tali tecniche esecutive si manifestano in modo decisamente più elementare negli strumenti con doppio chanter come le zampogne italiane, per via delle possibilità eterofoniche che impegnano il suonatore in elaborazioni virtuosistiche della melodia, soprattutto fondate su invenzioni di tipo contrappuntistico.⁷⁵ In questo ambito si riscontra la differenza nell'utilizzo degli abbellimenti di tipo glissato/portamento sulle zampogne rispetto a quello che se ne fa sulle cornamuse. L'utilizzo del glissato come passaggio graduato, ascendente o discendente, esclusivamente da una posizione della scala a quella successiva (negli aerofoni a sacco sarebbe difficoltoso se non impossibile eseguire tecniche di glissato continuo effettuate sull'intera scala, così come per il clarinetto) è una pratica che è possibile riscontrare esclusivamente in alcuni sporadici casi di esecuzioni tradizionali⁷⁶ oppure nei repertori più recenti, che differiscono in maniera notevole da quelli tradizionali. La marginalità del fenomeno motiva così la scelta di adottare un modello di interfaccia semplificato, che non considera la possibilità di occlusione parziale dei fori e può ben rappresentare il funzionamento di una zampogna anche tramite un sistema a due soli stati (aperto/chiuso).

Come già discusso, la variazione di pressione d'aria esercitata sulle ance per mezzo dell'otre non ha una vera e propria rilevanza nell'esecuzione del brano in quanto non permette modulazioni di intensità sonora o di intonazione delle note emesse, utili dal punto di vista musicale. Al contrario, il corretto utilizzo dell'otre risulta uno degli elementi di maggiore complessità in un aerofono a

⁷⁵ F.Guizzi, R.Leydi – *Le zampogne in Italia*, 1985. pag. 97

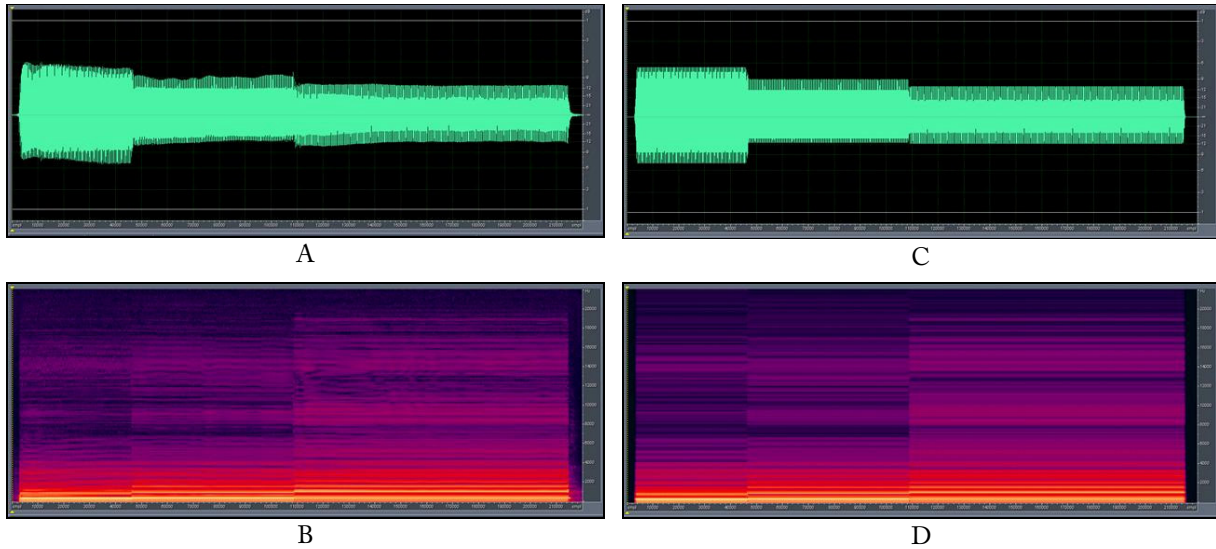
⁷⁶ Vedi la suonata "crapareccia" tipica del basso Lazio, segnalata da Marco Cignitti, suonatore e costruttore di zampogne.

sacco. Potendo considerare il parametro di controllo dell'otre secondario, si è scelto di implementarlo nell'interfaccia in modo semplificato. Infatti, nonostante si tenga in previsione l'utilizzo di un serbatoio d'aria, il sensore che dovrà misurare la pressione al suo interno dovrà tenere esclusivamente conto di due stati (acceso/spento), riconosciuti tramite un meccanismo di soglia. L'uso di un parametro di controllo dell'otre svincolato dalla dinamica della pressione, garantisce all'utilizzatore maggiore libertà in fase di esecuzione pur mantenendo l'ergonomia originaria.

3.2 Il modello per la sintesi

Come precedentemente riferito, il funzionamento della zampogna è assimilabile a quello dei legni ad ancia e, pertanto, risulta conveniente effettuare la ricerca dell'algoritmo adatto a sintetizzarne il suono considerando dapprima le tecniche comunemente utilizzate per la simulazione degli strumenti a fiato.

Come nel caso dell'interfaccia, la singolare tecnica di esecuzione propria degli aerofoni a sacco permette di considerare un modello di riferimento basato su alcune approssimazioni. La presenza dell'otre, interposto fra esecutore ed emettitori, oltre a non consentire una dinamica di intensità delle onde sonore, provoca anche limitazioni in relazione alla tempo-varianza del timbro. Va specificato che nella realtà le componenti degli spettri della zampogna, così come quelli di tutti gli altri aerofoni, anche nel caso di pressione costante riportano variazioni infinitesimali dovute alle turbolenze (casuali) dell'aria all'interno dello strumento. Inoltre, la pressione dell'otre può essere soggetta a variazioni indotte involontariamente dall'esecutore che, ovviamente, non può garantire una pressione sempre perfettamente costante. Tuttavia il fenomeno risulta marginale e consente di giustificare l'approssimazione al comportamento "ideale" (come riportato in precedenza, la qualità di un'esecuzione tradizionale viene valutata anche in considerazione della consonanza fra le note, che deve risultare perfettamente stabile) che introduce, così, il fattore di tempo-invarianza degli spettri. La validità di tale modello è apprezzabile nell'esempio sotto riportato (v. fig. 3-1) che confronta un segnale audio autentico, ricavato dalla registrazione di una canna sonora di zampogna, con quello approssimato (tempo-invariante) generato tramite sintesi per *wavetable*. I file audio sono disponibili nel cd allegato alla tesi e on-line, all'indirizzo <http://www.ezampogne.tk>.



Ascolta il segnale audio (originale)

(<http://ezampogne.altervista.org/6pMancaOriginal.wav>)

Ascolta il segnale audio (sintetico)

(<http://ezampogne.altervista.org/6pMancaWavetable.wav>)

Fig. 3-1. Rappresentazione della forma d'onda (a) e dello spettrogramma (b) di un segnale autentico (spettro tempo-variante) e di uno sintetico (spettro tempo-invariante) (c, d). A livello percettivo la differenza è minima e la simulazione risulta realistica. I segnali sono riferiti a una sequenza di tre note eseguite sul chanter sinistro di una zampogna a chiave.

La valutazione delle tecniche di sintesi implementabili nel *software* per la simulazione del suono dovrà, pertanto, essere operata in considerazione del modello semplificato. Non solo; oltre ad assicurare la qualità della simulazione, l'algoritmo dovrà garantire la validità dell'approccio adottato per tutti i tipi di strumento selezionabili e per le loro varianti, in linea con i principi di scalabilità e flessibilità già discussi in fase introduttiva. La definizione dello strumento si articola in base alla scelta di tre parametri principali:

1. modello di zampogna (e quindi tipo di emettitore);
2. misura dello strumento (e quindi tonalità di base);
3. temperamento delle note della scala.

Definite le premesse, è possibile passare all'analisi dello stato dell'arte. All'attualità non si è a conoscenza dell'esistenza di un *software* di sintesi efficiente che permetta la simulazione *real-time* del

suono della zampogna⁷⁷. È nota, invece, l'esistenza di *software* per computer, distribuiti sotto forma di *plugin* per le DAW di uso comune (Cubase, Logic, ProTools, ecc.) e moduli di sintesi integrati nelle interfacce di controllo elettroniche *bagpipe-like* che simulano il suono della cornamusa, strumento di più larga diffusione. La maggior parte di questi sistemi utilizza algoritmi di sintesi basati sull'esecuzione sistematica di campioni sonori pre-registrati⁷⁸, oppure basati sull'utilizzo di *wavetable*⁷⁹. La *wavetable* è un vettore (o tabella) di campioni sonori che riporta la sequenza relativa al periodo dell'onda; la sintesi per *wavetable* è effettuata tramite lettura ciclica dei valori memorizzati all'interno di detta tabella ma, affinché la simulazione del suono risulti realistica, è necessario disporre di un numero di tabelle sufficienti a rappresentare i differenti timbri caratteristici dello strumento. I sistemi presi in esame implementano detta tecnica con un numero di tabelle pari alle note eseguibili sullo strumento con il risultato di una sintesi realistica, nonostante l'approssimazione alla tempo-invarianza dei timbri introdotta. Tuttavia, detta tecnica risente di evidenti limitazioni: a causa della sua natura *sample-based* non risulta efficiente in caso di trasposizione eccessiva delle note⁸⁰.

L'alternativa principale all'uso delle *wavetable* risiede nella sintesi per modelli fisici; l'uso di detta tecnica viene riscontrato in alcuni progetti di ricerca che si occupano della simulazione di strumenti a vento "non convenzionali" e rapportabili al caso della zampogna, come l'aerofono a sacco irlandese Uilleann Pipe e l'oboe popolare greco Zournas, i cui studi sono stati condotti rispettivamente da Cannon-Hughes-Ó Modhráin⁸¹ e Tzevelekos-Kouroupetroglou⁸².

La sintesi per modellazione fisica e quella per modelli spettrali rappresentano attualmente i metodi di simulazione più avanzati e dai risultati più realistici. Dette tecniche sono state oggetto di ricerca soprattutto nell'ultimo ventennio poiché lo sviluppo delle capacità computazionali dei

⁷⁷ Ci si limita a riportare l'esistenza di un programma realizzato in Javascript e disponibile sul sito web <http://zampogna.altervista.org> che permette la simulazione del suono di una zampogna molisana "25" in Sol4 e il controllo della stessa tramite tastiera di computer. L'algoritmo alla base del *software*, sviluppato da Nicola Boehny e Ilario Garbani, è basato sull'esecuzione di campioni audio pre-registrati e non risulta particolarmente flessibile; non offre possibilità di trasposizione della tonalità né selezione di differenti modelli di zampogna.

⁷⁸ Il software The Fred Morrison Sound distribuito da ePipes mette a disposizione dell'utente i suoni di un gran numero di cornamuse differenti e permette anche la regolazione dell'intonazione (<http://www.epipes.co.uk/products.html>)

⁷⁹ Questo è il caso dei moduli sonori integrati nelle cornamuse elettroniche, come ad esempio V-pipes, Midi-Pipe SGM200 e Technopipe, analizzate in questa tesi in riferimento all'interfaccia di controllo (v. cap. 4).

⁸⁰ La trasposizione non risulta efficiente in caso di sovracampionamento eccessivo della tabella poiché la massima frequenza rappresentata ricadrebbe nella banda udibile, generando un vuoto nello spettro del segnale sintetizzato.

⁸¹ C. Cannon , S. Hughes , S. Ó Modhráin - EpipE: exploration of the Uilleann pipes as a potential controller for computer-based music, 2003.

⁸² P. Tzevelekos, G. Kouroupetroglou - Acoustical analysis of woodwind musical instruments for virtual instrument implementation by physical modeling, 2004.

calcolatori ne ha permesso l'implementazione in tempo reale; esse si sono imposte sulle tecniche di sintesi antecedenti (in uso negli anni '70 e '80), come quella per modulazione di frequenza (FM) o quella per *waveshaping*, che oggi vengono considerate obsolete.⁸³

Sia per la modellazione fisica, sia per quella spettrale, la tecnica non definisce un algoritmo di sintesi univoco, ma solamente il tipo di approccio su cui esso si basa; ne consegue che ognuna delle due tecniche presenta molteplici varianti di implementazione. La differenza principale fra le due "famiglie" di algoritmi risiede proprio nel tipo di approccio adottato.

1. Approccio *source-based*: nella modellazione fisica si tende a definire l'approccio "*source-based*" poiché gli algoritmi di sintesi sono costruiti a partire dallo studio dei processi di formazione del suono e implementati tramite formulazioni matematiche che ne descrivono minuziosamente il funzionamento. Uno fra i cinque principali metodi e cioè la sintesi per guida d'onda o *digital waveguide* risulta il più "popolare" per via della sua efficienza a livello computazionale che ne permette l'impiego in *real-time*.⁸⁴ Inoltre, è particolarmente adatto alla sintesi di un aerofono poiché si basa sulla simulazione dei percorsi delle onde sonore sviluppate all'interno dello strumento. Nel metodo classico lo strumento viene rappresentato tramite decomposizione dei suoi singoli elementi: l'ancia costituisce il blocco logico di eccitazione, caratterizzato da un comportamento non lineare; ogni sezione del corpo risonante viene descritta da una coppia di linee di ritardo (*delay line*) che simulano l'effetto del tempo di propagazione delle onde (cioè l'altezza della nota suonata) e sono caratterizzate da comportamento lineare; i fori e il padiglione sono rappresentati da giunzioni di dispersione (*scattering junction*) e filtri digitali che si occupano di simulare la riflessione di una parte dell'energia e la radiazione della parte restante. Nella presente tesi ci si astiene dal riportare nel dettaglio la descrizione di ogni elemento, ma si dà soltanto atto delle formulazioni per la rappresentazione delle ance semplici e dei corpi risonanti cilindrici presenti nello studio condotto da Scavone⁸⁵, delle ance doppie in quello di Guillemain⁸⁶ e dei fori digitali in quello di Terroir-Guillemain⁸⁷.

⁸³ State of the Art and Future Directions on Musical Sound Synthesis – X. Serra, 2007.

⁸⁴ State of the Art and Future Directions on Musical Sound Synthesis – X. Serra, 2007.

⁸⁵ G. P. Scavone – An Acoustic Analysis of Single-Reed Woodwind Instruments, with an Emphasis on Design and Performance Issues and Digital Waveguide Modeling Techniques, 1997.

⁸⁶ P. Guillemain – A digital synthesis model of double-reed wind instruments, 2004

⁸⁷ P. Guillemain, J. Terroir – A simple dynamic tonehole model for real-time synthesis of clarinet-like instruments, 2005.

2. Approccio *signal-based*: a differenza del caso precedente, l'implementazione della tecnica SMS non prevede una fase preliminare di studio del funzionamento dello strumento, poiché la sintesi è basata esclusivamente sull'emulazione delle caratteristiche del suono percepite dall'ascoltatore⁸⁸. Gli algoritmi che implementano detta tecnica (classificabile come metodo di analisi/re-sintesi) utilizzano, per la generazione del segnale, parametri estratti dall'analisi in frequenza di campioni audio pre-registrati. Affinché sia garantita la descrizione del comportamento tempo-variante del segnale, l'analisi viene effettuata ricorsivamente su più porzioni del segnale. Nel metodo illustrato da Serra⁸⁹ un processo iniziale di rilevamento dei picchi dello spettro isola la componente deterministica del segnale (nel caso di suoni armonici essa costituisce la parte principale) da quella stocastica (corrispondente al segnale residuo); successivamente, la generazione avviene per mezzo di tecniche di sintesi additiva, tramite l'aggiornamento in tempo reale dei valori di ampiezza e di frequenza degli oscillatori. Il numero di oscillatori da implementare è pari alle componenti dello spettro memorizzate nel database. La componente stocastica, invece, viene sintetizzata tramite tecnica sottrattiva (generazione di rumore bianco più filtraggio). Un esempio di utilizzo della tecnica SMS nella simulazione di aerofoni ad ancia è in SALTO di Haas⁹⁰.

Il successo di queste due tipologie di algoritmi è motivato dall'alta qualità della sintesi effettuata; i segnali riprodotti appaiono particolarmente realistici poiché i metodi garantiscono la variazione dei caratteri spettrali nel tempo. L'implementazione della tempo-varianza del timbro risulta essenziale nella sintesi della maggior parte degli strumenti musicali, aerofoni ad ancia compresi, poiché alcuni strumenti sono talmente "caratterizzati" da questo comportamento che, in sua assenza, il suono generato risulterebbe palesemente artificioso. Tuttavia, entrambi i metodi analizzati presentano lati negativi. Il principale svantaggio della modellazione per guide d'onda risiede nella complessità del suo approccio, che necessita l'adattamento delle formule matematiche utilizzate per rappresentare il comportamento degli strumenti simili (oboi e clarinetti) alle zampogne analizzate. Inoltre, la sintesi di uno strumento musicale fondata esclusivamente sui suoi parametri costruttivi (caratteristiche degli emettitori, dimensioni dei canneggi, grandezza e posizione dei fori, ecc.) rende difficoltosa l'individuazione di un modello unico valido per tutti i casi da implementare⁹¹, con influenze negative sull'economia generale del progetto. Un algoritmo di tipo

⁸⁸ State of the Art and Future Directions on Musical Sound Synthesis – X. Serra, 2007.

⁸⁹ X. Serra – A System for Sound Analysis/Transformation/Synthesis based on a Deterministic plus Stochastic Decomposition, 1989.

⁹⁰ J. Haas – SALTO, A Spectral Domain Saxophone Synthesizer, 2001.

⁹¹ Per garantire la simulazione di più zampogne, differenti per tipologia, tonalità e temperamento della scala, occorrerebbe generare un modello per ogni possibile variante.

SMS garantisce una qualità sonora comparabile a quella del campionamento diretto, proprio in virtù della quantità di parametri memorizzati all'interno del database. La particolare ricchezza armonica propria dei suoni delle zampogne implica però la necessità di gestire un numero di oscillatori troppo elevato⁹² e, pertanto, anche questo approccio viene abbandonato.

In considerazione del modello semplificato di zampogna adottato nel progetto risulta possibile implementare tecniche di sintesi meno “sosticcate”. In particolare è stata scelta la tecnica di analisi/re-sintesi di tipo sottrattivo, che analizza gli spettri dei segnali di alcune zampogne registrate, come nel caso della tecnica SMS, ma li codifica con una quantità di parametri notevolmente inferiore. La tecnica implementata è ispirata ai metodi di modellazione dello spettro basati sull'individuazione delle formanti. I procedimenti di analisi e sintesi vengono trattati nel capitolo 5.

⁹² Il periodo della nota inferiore di una zampogna a chiave di misura 6 palmi (o “25” doppia) ha frequenza fondamentale pari a circa 100 Hz; di conseguenza il numero di oscillatori necessari a rappresentare il suo spettro nella banda udibile risulta non inferiore a 150.

Capitolo 4

L'interfaccia (livello I)

Nella computer music, il termine interfaccia non è univoco e potrebbe creare fraintendimenti. Esso si riferisce a tutte le componenti di un sistema complesso che si frappone fra l'utilizzatore finale e il meccanismo di generazione del suono⁹³. Fra i livelli di interazione con il sistema è possibile identificare:

1. gli editor grafici, utili per la gestione e l'elaborazione di una composizione musicale in tutte le sue forme (note, strumenti, campioni e oggetti sonori);
2. i sistemi di composizione musicale automatica, basati sulla scrittura di algoritmi che generano autonomamente delle composizioni musicali o sono in grado di integrare nella composizione nuove informazioni sulla base di dati in input del sistema;
3. i software informatici performativi, che offrono all'utente i mezzi per interagire con il sistema di generazione del suono in tempo reale;
4. le interfacce gestuali.

In questo capitolo col termine interfaccia si fa riferimento alla sua accezione di interfaccia gestuale; cioè tutta la componente meccanica ed elettronica che rileva i movimenti del musicista sullo strumento, li interpreta sulla base di alcuni parametri modificabili, li trasforma e li invia, codificati secondo un protocollo di comunicazione, al software di sintesi. La sezione relativa

⁹³ C. Roads – The computer music tutorial, 1996. p. 616

all'interfaccia grafica, con la quale l'utente accede ai parametri del sintetizzatore, viene invece trattata separatamente nel capitolo 5, in cui si descrive il funzionamento del sintetizzatore.

Abbiamo bisogno di macchine che rispondano al resto del nostro corpo e al resto del mondo. La tecnologia su cui si basano le interfacce grafiche (GUI) ci permette di spostare, copiare e incollare informazioni da una parte all'altra, ma non nota se qualcuno si muove oppure urla.⁹⁴

L'interfaccia di controllo rappresenta la componente più importante nel progetto per quanto riguarda l'interazione in tempo reale. Essa ha il compito di garantire l'affidabilità e l'usabilità del sistema, mediando fra i movimenti del fruitore e le informazioni inviate al sintetizzatore, colmando così lo spazio esistente fra il calcolatore e il "mondo reale", senza introdurre evidente/apprezzabile latenza. Lo scrittore e programmatore Chris Crawford esprime il concetto di interazione come il "processo ciclico di ascolto, elaborazione del pensiero e risposta fra due o più attori". La scissione di queste tre componenti può essere associata nel caso delle interfacce di *physical computing* (la materia che studia l'interazione fra dispositivi elettronici "digitali" e mondo esterno "analogico") alla separazione logica dei tre principali blocchi di cui essa si compone:

1. Input: il complesso delle operazioni di ricezione delle informazioni fisiche in ingresso al sistema. L'intero blocco logico si basa sul principio della trasduzione, ossia di quel processo per mezzo del quale una grandezza meccanica si trasforma in grandezza elettrica. Gli argomenti trattati in questa sezione si riferiscono allo studio dei sensori per il rilevamento dei movimenti dell'esecutore sullo strumento.
2. Processing: le operazioni effettuate dal sistema che permettono di interpretare i movimenti dell'utente sull'interfaccia. Questa sezione motiva la scelta della piattaforma di *physical computing* per la gestione delle operazioni di I/O e lo sviluppo del codice necessario per l'interpretazione dei segnali in ingresso e per la generazione della risposta del sistema sul canale in uscita.
3. Output: il meccanismo di canalizzazione della risposta del sistema verso il programma che gestisce l'algoritmo di sintesi. Questa ultima sezione comprende l'analisi della circuiteria implementata nell'interfaccia e la scelta del protocollo di comunicazione.

⁹⁴ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004.

4.1 Stato dell'arte

La ricerca di un sistema di controllo dei movimenti efficiente, stabile e soprattutto utilizzabile, è passata attraverso l'esame dello stato dell'arte, analizzando alcuni modelli di interfaccia di controllo esistenti. Fra quelle attualmente presenti sul mercato, o in via di sviluppo nel settore della ricerca, si annoverano i sottoelencati controller per la simulazione di strumenti a fiato generici:

1. Yamaha WX Series⁹⁵
2. Akai EWI Series⁹⁶
3. The PIPE / The Holey Controller⁹⁷

I primi due modelli rappresentano quanto di più evoluto esiste nel panorama commerciale relativamente ai *wind controller*. Questi tipi di interfaccia gestuale rappresentano l'implementazione elettronica di uno strumento a fiato generico, la cui configurazione si rifà a quella dei legni ad ancia⁹⁸; essi consentono la rilevazione del tocco delle dita sui tasti (che rappresentano l'astrazione virtuale dei fori digitali e delle chiavi di uno strumento reale), la pressione delle labbra sullo strumento e dell'aria immessa dall'imboccatura dello stesso. Le principali differenze rispetto al comportamento di uno strumento reale, consistono nel non-movimento dei tasti del controller, che rappresentano le chiavi, e nel non-consumo dell'aria immessa. Ciò che conferisce a dette interfacce un assoluto motivo di preferenza, rispetto all'uso di un qualsiasi altro controller tradizionale (ad esempio la tastiera elettronica), è il controllo diretto della pressione dell'aria, rilevata per mezzo di sensori di pressione del gas incidente e codificata come parametro variabile e continuo, necessario per un controllo realistico dell'algoritmo di sintesi corrispondente.

Il terzo modello di interfaccia, ad opera della ricerca di Scavone, si propone come prototipo di controller a fiato, frutto di un'evoluzione diretta⁹⁹ di modelli precedenti di interfaccia¹⁰⁰. Oltre a

⁹⁵ Yamaha WX 5 (<http://www.yamahasynt.com>)

⁹⁶ Akai EWI 4000s (<http://www.akaipro.com>)

⁹⁷ G.P.Scavone - THE PIPE: Explorations with Breath Control, 2003.

⁹⁸ Le diteggiature degli aerofoni ad ancia quali clarinetto, oboe e sassofono, sostanzialmente simili fra loro soprattutto nel primo registro, sono considerate le più complete fra quelle esistenti; pertanto, i *wind controller* offrono una configurazione di base di questo tipo, che poi può essere modificata in base alle necessità soggettive degli utilizzatori.

⁹⁹ È doveroso effettuare una precisazione in merito a questa interfaccia, che può essere vista come l'evoluzione di un prototipo precedente di *wind controller*: il *Holey Controller*, sempre a opera dello stesso autore, frutto di alcune modificazioni applicate a un

un differente sistema di rilevamento della pressione d'aria esercitata su di esso, esso è dotato di un meccanismo di rilevamento del tocco sui tasti con una gamma dinamica tale da simulare il comportamento dell'occlusione parziale dei fori, non presente nei modelli precedenti. Questo tipo di parametro viene sfruttato come forma di controllo di algoritmi di sintesi del suono complessi, come quelli basati sui modelli fisici studiati dal medesimo autore.

Fra le interfacce di controllo che più si approssimano a quella che si è voluto sviluppare nella presente tesi, vi sono i *pipe controller*, cioè le interfacce elettroniche che permettono il controllo di uno strumento del tipo cornamusa. Dei numerosi modelli esistenti sul mercato, i più degni di nota sono:

1. Midi-Pipe SGM200
2. Fagerstrom's Technopipe / Master gaita / Degerpipes
3. V-pipes

Tutti i modelli sopra elencati si presentano come interfacce di controllo comprensive di modulo di sintesi per la generazione del suono¹⁰¹ e vengono utilizzati come strumenti musicali da studio, da concerto¹⁰² o come semplici interfacce generiche, da utilizzare anche per il controllo di algoritmi di sintesi differenti da quelli che simulano esclusivamente i suoni delle cornamuse. In questo senso, basti pensare alle analogie esistenti fra la diteggiatura di una cornamusa scozzese e quella del *tin-whistle* (noto flauto tradizionale anglosassone) o di quelle di molti strumenti a fiato delle tradizioni popolari internazionali¹⁰³.

Altri fattori importanti, che motivano il successo di questo tipo di tecnologia, risiedono nella scalabilità e nella possibilità di personalizzazione che detti strumenti consentono. Le funzioni di *pitch* e *octave shift*, o la possibilità di impostare combinazioni personali dei tasti per l'esecuzione delle note, richiamabili per mezzo di semplici *preset* memorizzati all'interno del sistema, semplificano

Yamaha WX11, viene rielaborato su una nuova interfaccia *stand-alone* dotata di soli sette sensori tattili di tipo FSR e un'imboccatura più igienica.

¹⁰⁰ G. P. Scavone. The Holey Controller (<http://www.music.mcgill.ca/~gary/HoleyController.html>)

¹⁰¹ A seconda dei casi, il modulo viene implementato all'interno dello strumento o è presente come modulo esterno.

¹⁰² Vedi il caso del *gaitero* asturiano Jose Angel Hevia, internazionalmente noto per via dell'adozione del innovativo controller Midi-Pipe SGM200, come suo principale strumento, oltre che per la sua musica.

¹⁰³ Lo stesso tipo di ragionamento è plausibile nel caso in cui si voglia sfruttare la coerenza fra le estensioni dei doppi chanter di zampogna e le loro configurazioni equivalenti nei doppi flauti tradizionali italiani.

notevolmente l'esecuzione musicale, offrendo ulteriori possibilità di adattamento personale o di sperimentazione.

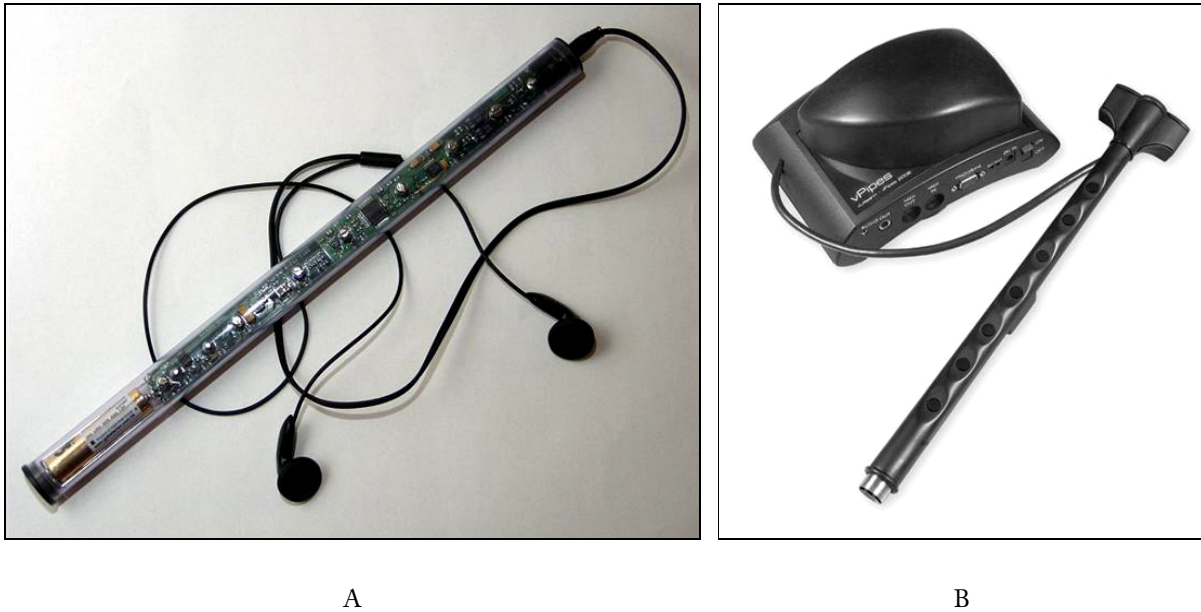


Fig. 4-1. Technopipe chanter¹⁰⁴ (a) senza simulatore dell'otre e V-pipe¹⁰⁵ (b) con simulatore.

Un ulteriore interfaccia oggetto di esame è quella del progetto EpipE sviluppato da Cannon, Hughes e O Modhráin, che studia le caratteristiche della *Uilleann Pipe*, cornamusa irlandese dalle molteplici possibilità armoniche, riportandone il comportamento su un prototipo di interfaccia di controllo innovativo. L'implementazione della EpipE si basa sulla relazione esistente fra le dita dell'esecutore e i fori digitali dello strumento, durante l'esecuzione del brano. In particolare il corretto rilevamento dell'occlusione (totale o parziale) del foro viene effettuato tramite sensori che misurano la percentuale di copertura dello stesso, che dipende dall'angolo di inclinazione del dito e non dalla pressione applicata sul foro¹⁰⁶ (vedi par. 4.2.7), come viene fatto nell'*Holey controller*.

¹⁰⁴ Fagerstrom Technopipes (<http://www.fagerstrom.com/technopipes/index.html>)

¹⁰⁵ vPipes - Next Generation Electronic Bagpipes (<http://www.vpipes.com/>)

¹⁰⁶ C.Cannon , S.Hughes , S.Ó Modhráin - EpipE: exploration of the Uilleann pipes as a potential controller for computer-based music, 2003.

4.2 Input

Come stabilito nel modello dell'interfaccia, la zampogna elettronica richiede l'implementazione di un sistema di input che permetta il riconoscimento di due elementi: la posizione delle dita sulle canne sonore e la pressione esercitata sull'otre dello strumento.

Il primo obiettivo è perseguibile in più modi. Per completezza, va considerata l'esistenza di vari algoritmi per l'analisi di video, che permettono il riconoscimento della posizione di un oggetto attraverso l'elaborazione di porzioni di immagine, riprese da una videocamera. Questo tipo di implementazione è molto innovativa e interessante ma comporta numerosi problemi connessi alle condizioni di utilizzo del sistema, che risultano pertanto notevolmente vincolanti (si pensi ai fattori di illuminazione variabili e alla necessità di disporre di più videocamere per la ripresa. Nell'ottica del mantenimento dell'ergonomia originale, come già discusso in fase di sviluppo del modello, l'utilizzo di un'interfaccia di controllo ispirata a quelle esistenti sembra la scelta migliore; pertanto ci si è indirizzati verso la costruzione di un dispositivo elettronico dotato di più canne equipaggiate con sensori tattili, o con altri componenti tecnologici equivalenti che permettano il rilevamento del tocco delle dita. Anche da questo punto di vista esistono più opzioni. Per lo sviluppo del progetto in esame è stato preso in considerazione l'utilizzo dei componenti elettrici che di seguito vengono descritti.

4.2.1 *Force Sensitive Resistor (FSR)*

I modelli più diffusi di FSR sono composti da una piastrina tattile flessibile, al cui interno vi sono due sottili pellicole di poliestere fra cui vengono interposte matrici di elettrodi. L'insieme degli elettrodi non cortocircuitati conferisce al dispositivo una resistenza elettrica molto alta; applicando sulla piastrina una forza meccanica esterna gli elettrodi vengono messi in contatto in una quantità proporzionale alla forza applicata, causando così la caduta della resistenza e aumentando di conseguenza il fattore di conduttività elettrica¹⁰⁷.

Fra quelli sul mercato, è possibile reperirne di forma e caratteristiche di risposta differenti, ma nella maggioranza dei casi detti resistori si presentano circolari, piatti e di dimensioni modeste (quelle minime presentano un diametro di 8-10 mm). I modelli più diffusi sono studiati appositamente per garantire una risposta veloce alla più leggera pressione delle dita, ma affinché rispondano correttamente, richiedono che la superficie di contatto su cui vengono incollati sia

¹⁰⁷ Tekscan Flexiforce force sensor (<http://www.tekscan.com/flexiforce/flexiforce.html>)

perfettamente liscia; nel caso contrario possono generare errori nel rilevamento della pressione¹⁰⁸. Fra le interfacce di controllo analizzate che integrano questa tecnologia si menzionano la EpipE, il Holey Controller e le V-pipes.

4.2.2 Termoresistenze e termistori

Di dimensioni modeste, di facile reperibilità e relativamente economici, detti dispositivi sono in grado di variare la loro resistenza elettrica in modo più o meno lineare sulla base della temperatura circostante. In virtù del principio per cui il corpo umano, e quindi anche le dita delle mani, producono un calore ben definito, questa tecnologia può essere sfruttata nell'implementazione dei sensori di tocco¹⁰⁹. Sono reperibili sul mercato sensori di varia natura, forma e soprattutto precisione (i termistori, o sensori termici, differiscono dalle classiche termoresistenze, o *Resistance Temperature Detector* (RTD), per via dei materiali che li costituiscono che nel primo caso sono ceramici e/o plastici mentre nel secondo puramente metallici). I più comuni sono piccoli trasduttori, quindi componenti passivi; è possibile però reperire sensori con un tipo di implementazione del segnale in uscita digitale, che si presentano sotto forma di circuiti integrati.

4.2.3 Fotocellule e IR

Anche noti come CdS *cells* (alla cui base vi è il composto chimico del solfuro di cadmio), Ldr (*light dependent resistors*) o, più comunemente, fotoresistenze, detti componenti elettrici hanno la proprietà di ridurre il loro fattore di resistenza con l'aumento della quantità di luce incidente sulla faccia del dispositivo dotata di elettrodi. Nonostante questa sia una tecnologia che non permette il rilevamento diretto del tocco umano, è possibile fruirne in modo indiretto mediante la sua integrazione nei fori digitali: l'occlusione di un foro interrompe il passaggio della luce al suo interno, modificando di conseguenza il segnale all'ingresso del controllore, così come nei casi precedenti.

¹⁰⁸ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.285

¹⁰⁹ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.290



Fig. 4-2. Esempio di integrazione di una fotocellula all'interno di una canna sonora.

Esistono anche altre tecnologie, più complesse, che utilizzano un meccanismo di funzionamento simile. I sensori IR (a onde elettromagnetiche di banda infrarossi) e quelli ultrasonici (a onde acustiche di banda non udibile) vengono infatti implementati nei sistemi di controllo del movimento e della posizione e si basano sulla misurazione del ritardo o della quantità di energia, di un segnale emesso da un trasmettitore, successivamente deviato da un corpo esterno e infine catturato da un ricevitore. Il controller della Midi-Pipe SGM 200, prodotto dalla Version Midi, si orienta in questa direzione, implementando sensori ottici¹¹⁰ che rilevano l'occlusione dei fori per mezzo della vicinanza delle dita dell'esecutore alla canna.

4.2.4 Sensori di tocco capacitivi

Questa tecnologia si basa su una particolare proprietà posseduta dal corpo umano, ossia la capacità di immagazzinamento di piccole quantità di carica elettrica. In considerazione di ciò una qualunque parte del corpo può essere associata all'armatura di un condensatore elettrico, la cui variazione di capacità avviene per mezzo del tocco (o del suo semplice avvicinamento) di un particolare elettrodo, connesso all'altra armatura del condensatore. La limitazione principale di detti sistemi consiste nell'impossibilità del loro sviluppo come semplici componenti passivi, come nei casi precedenti, ma richiedono l'implementazione di una notevole quantità di circuiteria aggiuntiva¹¹¹. Lo sviluppo di un sensore basato sulle proprietà capacitive del corpo umano richiede l'utilizzo di circuiti integrati dedicati, ai cui input viene collegato il sistema di condensatori, resistenze ed elettrodi, a cui si deve la variazione di capacità. Detti integrati sono realizzati in modo tale da rilevare il superamento di una soglia di tensione, indotta dal tocco, e rispondere generando dei segnali corrispondenti in

¹¹⁰ Nonostante la ricerca effettuata, non si è potuto comprendere in maniera esaustiva la tecnologia adoperata in questa interfaccia.

¹¹¹ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.288

output, i cui valori elettrici di tensione sono interpretabili dal microcontrollore dell'interfaccia. Nei casi analizzati, l'output dei sensori è di tipo digitale (cioè a due stati, 0V o 5V) e non possiede gamma dinamica di tensione. In tal modo è possibile costruire bottoni sensibili al tocco, o al cosiddetto quasi-tocco, non meccanici in grado di generare risposte per distanze di pochi millimetri. Fra le interfacce di controllo analizzate, che sfruttano questa tecnologia nella rilevazione della posizione delle dita dell'esecutore, si menzionano la Fagestrom's Technopipe, la Degerpipe e l'AKAI EWI.

4.2.5 *Push button*

Sicuramente l'utilizzo di questa tecnologia è il metodo più semplice di implementazione di un sistema di rilevamento del tocco o meglio della pressione delle dita su un tasto. Il *push button* altro non è che un particolare tipo di interruttore che risponde alla pressione esercitata su di esso chiudendo il contatto elettrico dei due poli connessi fino a quando non viene rilasciato. La presenza di tre poli di contatto trasforma l'interruttore in un deviatore a due vie, che commuta il flusso di corrente entrante dal primo polo fra gli altri due contatti. L'alternanza è regolata, ovviamente, dalla pressione esercitata sul bottone. È intuitivo comprendere che questo sistema non offre gamma dinamica di tensione in uscita, ma permette solo il controllo di un semplice circuito aperto/chiuso. Inoltre, a seconda del tipo di componente utilizzato, la resistenza meccanica del tasto alla pressione esercitata dall'esterno può essere più o meno considerevole, incidendo sull'usabilità del sistema.

Un tipo particolare di sensore di pressione preso in considerazione è quello realizzato dalla CUI Inc., che miscela il design compatto e l'approccio di un comune *push button*, con il principio di funzionamento basato sulla resistenza variabile, proprio dei FSR. Il risultato è quello di un componente ibrido che si installa nella canna sonora come un bottone a pressione, ma si interfaccia al sistema di controllo come una resistenza.

4.2.6 **Altri metodi**

Esistono ulteriori metodi per mezzo dei quali è possibile rilevare il tocco delle dita. Tra questi vi è quello che, sfruttando le proprietà di conduzione elettrica della pelle, utilizza il tocco di un elettrodo come ponte di collegamento di un circuito che connette l'ingresso del microcontrollore alla massa (GND) del sistema. Nella condizione di partenza, la tensione del segnale applicato all'ingresso è ben definita ma un eventuale tocco dell'elettrodo per mezzo di un dito ne causa la caduta, portando sull'input del microcontrollore la variazione desiderata. Lo svantaggio principale di questo tipo di

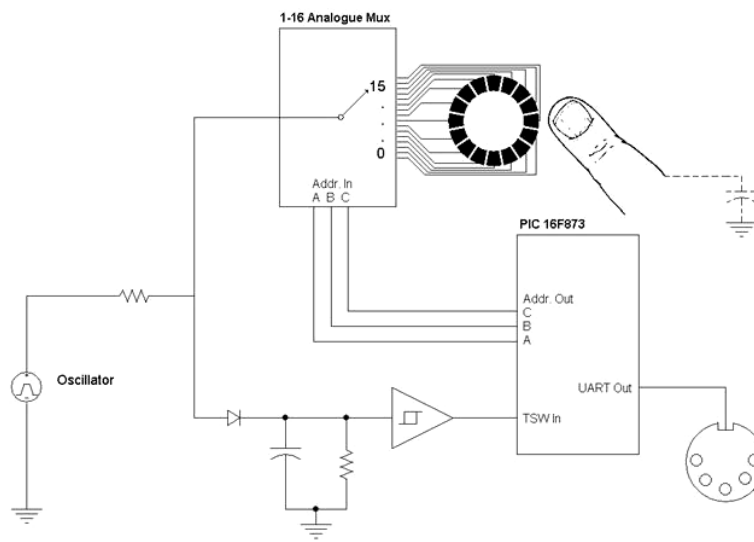
approccio risiede nella necessità di mantenere il corpo costantemente collegato alla massa del circuito.

4.2.7 La scelta del sensore

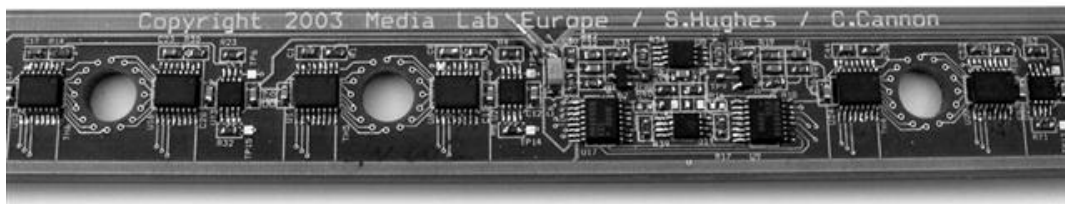
Alcuni dei componenti appena descritti sono accomunati da un particolare meccanismo di funzionamento che risponde al principio della resistenza variabile. L'implementazione di questi dispositivi si effettua frapponendo il componente tra una sorgente di alimentazione elettrica stabile (a tensione fissa) e il canale di ingresso del microcontrollore; dopodiché, sulla base di alcuni parametri esterni, questi componenti variano il loro fattore di resistenza inducendo negli input un cambiamento del segnale ricevuto, condizione interpretabile nel modo adeguato dal microcontrollore. Altri, invece, sfruttano la capacità di generare direttamente il segnale utile sulla base del principio della trasduzione o previa alimentazione di un circuito integrato. Le considerazioni sul tipo di segnale che queste tecnologie offrono in uscita (l'output del sensore corrisponde all'input richiesto dal sistema che opera il processing) permette di operare una suddivisione di tutti i componenti analizzati in due gruppi distinti:

1. Output a più stati: del primo gruppo fanno parte quei componenti in grado di sviluppare in uscita un segnale provvisto di una gamma dinamica di tensione. Nel caso dei FSR, l'applicazione di una forza variabile sulla piastrina del sensore permette di emulare il controllo dell'occlusione graduata (quindi anche parziale) del foro digitale ma, come precedentemente stabilito, l'interfaccia non necessita questa funzionalità. Nella stessa categoria si annoverano le fotocellule e le termoresistenze. L'implementazione di questo tipo di tecnologia richiede l'interfacciamento al microcontrollore per mezzo di ingressi analogici dotati di convertitori ADC; l'approssimazione al comportamento binario (aperto/chiuso) avviene per mezzo della costruzione di funzioni di controllo a livello *software*, che discriminano lo stato sulla base del superamento di una soglia di tensione.
2. Output a due stati: al secondo gruppo appartengono i sensori che generano un segnale in uscita con due soli stati. La natura binaria degli output ne permette l'accoppiamento agli input digitali del microcontrollore, di gestione più semplificata in quanto essi non richiedono l'utilizzo di convertitori né l'implementazione di soglie. In questa categoria ricadono i sistemi capacitivi, i *push button* e tutte le tecniche assimilabili in grado di sviluppare due valori di tensione pari a 0V e 5V.

Una terza possibilità è quella adottata nel caso dell'EpipE. Questo sistema di controllo può essere considerato ibrido, a cavallo fra il primo ed il secondo gruppo. Il controllo dell'occlusione è sviluppato tramite un insieme di elettrodi proprio dei sistemi capacitivi, posizionati in prossimità dei bordi dei fori; il numero consistente di elettrodi implementati per ogni foro consente la simulazione del comportamento a più stati, garantendo il rilevamento dell'occlusione parziale. Fra tutti i casi analizzati, questo tipo di approccio offre sicuramente il controllo più realistico dello strumento, a discapito di una complessità di implementazione notevolmente superiore.



A



B

Fig. 4-3. Schema del funzionamento (a) del sensore tattile in EpipE e immagine di una sezione della scheda a circuito stampato corrispondente (b)¹¹².

Come riferito in precedenza, il controllo graduato dell'occlusione non risulta necessario nell'interfaccia della zampogna pertanto la valutazione delle tecnologie analizzate prende altresì in considerazione fattori quali: affidabilità, metodo di integrazione nel sistema, usabilità, costo. I

¹¹² S. Hughes, C. Cannon, S. O'Modhrain - EpipE : A Novel Electronic Woodwind Controller, 2004.

sistemi di rilevamento del tocco basati sulla pressione delle dita (FSR, *push button*) obbligano l'utilizzatore a esercitare una pressione minima e la natura del segnale generato impone il collegamento di questo tipo di sensori a ingressi analogici, presenti in numero limitato nella piattaforma di *processing* utilizzata (vedi par. 4.4). Il costo dell'implementazione completamente basata su tecnologia di tipo FSR diventa considerevole; anche la reperibilità dei componenti non risulta agevole (i sensori sul mercato vengono venduti a prezzi convenienti a partire da stock da 250 pezzi in su). I FSR risultano vantaggiosi nell'implementazione di un'interfaccia più complessa ma per questo progetto sono stati esclusi dalla scelta finale.

La particolare facilità di integrazione di sensori di temperatura all'interno dei fori dell'interfaccia, rappresenta l'unico vantaggio nell'adozione di detti componenti. I loro principali problemi consistono nella necessità di impostare una soglia variabile, basata sulle condizioni ambientali circostanti, con la quale effettuare il paragone in fase di misurazione della temperatura di ogni altro sensore (se il valore misurato è molto maggiore di quello esterno¹¹³ si è verificato il tocco). Inoltre, a causa del principio per il quale il calore non può dissiparsi rapidamente, come invece accade per la luce nel caso dell'uso di fotocellule, l'adozione di questo tipo di tecnologia richiederebbe l'uso di componenti estremamente precisi, quindi notevolmente più costosi di quelli comuni e, in alcuni casi, dalle dimensioni tali da non permettere la loro integrazione nell'interfaccia. L'alternativa sarebbe l'accettazione di un pesante compromesso: l'introduzione di una latenza causata dalla reazione troppo lenta dei componenti¹¹⁴ che si tradurrebbe nella mancanza di usabilità dell'interfaccia di controllo.

L'uso di fotocellule è vincolato dal fattore di luminosità esterno e dalle alterazioni che questo può causare nei valori di tensione dei sensori in fase di misurazione. In particolare, nel caso di utilizzo di semplici fotoresistenze, la cui fonte di illuminazione è subordinata alla presenza della sola luce esterna, è agevole intuire le problematiche associate alla variazione di questo fattore. Innanzitutto si rende necessario impostare una soglia variabile, come nel caso precedente, che si adatti alla luminosità esterna e permetta una giusta discriminazione degli stati aperto/chiuso, che rappresentano l'occlusione del sensore. La forte instabilità nella risposta di questi componenti, che sono soggetti a rumori *jitter* considerevoli, necessita l'implementazione di meccanismi che mediano nel tempo i valori rilevati. Questo tipo di funzione è facilmente realizzabile via *software* nella fase di

¹¹³ È facile intuire i problemi di discriminazione che avrebbe il sistema nei casi in cui questi componenti operassero in condizioni di temperature esterne prossime a quella del corpo umano.

¹¹⁴ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.290

processing tramite la costruzione di buffer di memoria¹¹⁵ ma comporta l'innalzamento della latenza del sistema (in una misura dipendente dalla profondità del buffer), con il rischio di generare una risposta ritardata. Inoltre, la dipendenza dalla luce esterna esclude la possibilità di utilizzo dell'interfaccia al buio o in condizioni di luminosità estremamente bassa. Una soluzione al problema potrebbe trovarsi nell'adozione di sensori ottici dotati di trasmettitori, come nel caso dei rilevatori di posizionamento IR o ultrasonici di cui è fatto cenno in precedenza. Questa implementazione svincola il sistema dalla dipendenza sopra evidenziata¹¹⁶, ma ne complica la fase di installazione: la forma e le dimensioni dei sensori IR, i più modesti della categoria, sono comunque tali da non permetterne praticamente l'integrazione; inoltre i *range* minimi di operatività, nei termini di distanza di rilevamento, risultano eccessivi¹¹⁷.

Un ulteriore importante fattore da prendere in considerazione è la durata vitale dei componenti. Tutti i dispositivi elettrici, infatti, sono destinati al danneggiamento naturale a causa dell'energia elettrica che li percorre. Il tempo di vita di un componente dipende, oltre che dalla qualità dei materiali utilizzati per la realizzazione, dalle modalità del loro impiego. Ad esempio, tutti i sensori che rilevano il tocco delle dita in funzione della pressione esercitata su di essi (FSR, *push button*), prevedono una componente di usura aggiuntiva, in base al principio meccanico di attivazione che non è previsto nei sensori di tocco a contatto o "sfioramento" (sensori capacitivi, termoresistenze e, per similarità, fotocellule e sensori di posizione).

La scelta di implementare i sensori basandosi sui sistemi capacitivi di tocco è apparsa la più indicata. In termini di integrazione dei componenti nell'interfaccia è possibile sostituire il foro della canna con l'elettrodo e adoperare un tasto rialzato rispetto al suo profilo, che può essere realizzato in materiale plastico e celare al suo interno l'elettrodo. La scelta di impiegare un sensore rialzato, piuttosto che uno piatto, è motivata esclusivamente dalla facilità di riconoscimento della sua posizione in fase di utilizzo. Una seconda opzione è quella di integrare l'elettrodo all'interno di un foro della canna dell'interfaccia, non puramente "rappresentato" ma effettivamente realizzato, come nel caso di implementazione di sensori a fotocellula (vedi fig. 4-2). Essendo il funzionamento di questa tecnologia svincolato dal tocco effettivo, viene garantita la perfetta simulazione del

¹¹⁵ La creazione di un buffer di memoria si effettua tramite l'inizializzazione di un vettore di N elementi in principio vuoto che ad ogni ciclo di aggiornamento misura il valore istantaneo di tensione e lo memorizza in una posizione variabile; dopodiché restituisce in uscita un valore che rappresenta la media di tutti i valori all'interno del vettore.

¹¹⁶ In realtà, come suggeriscono O'Sullivan-Igoe e Cannon-Hughes-O'Modhrain, i sensori ottici possono essere soggetti a interferenze dovute ai raggi luminosi esterni oppure alle variazioni delle radiazioni infrarosse emesse dall'esecutore.

¹¹⁷ La discriminazione dello stato di occlusione del foro dovrebbe avvenire entro *range* dell'ordine di pochi millimetri (fino a un massimo di un centimetro), mentre la maggior parte dei componenti in commercio, opera da qualche centimetro in su.

comportamento di occlusione del foro in fase di utilizzo, con notevoli vantaggi dal punto di vista dell'ergonomia.

I circuiti integrati (IC) presi in considerazione, che si occupano di mediare fra elettrodo e ingresso del microcontrollore, sono distribuiti da Atmel¹¹⁸ e fanno riferimento alla linea di prodotti QTouch. Essi presentano numerosi *pin* di contatto che, a seconda del numero di canali gestiti dal circuito, possono essere attivi o meno. Ad ogni uscita del IC corrisponde una coppia di ingressi per la connessione dell'elettrodo e della sua rete di *matching* (un sistema di resistenze e condensatori interposti fra elettrodo e ingressi del IC, come illustrato in fig. 4-4). Gli altri pin sono utilizzati per alimentare il IC e per definire alcune opzioni di funzionamento (sincronia tramite clock esterno, velocità di aggiornamento, modalità ad alto o basso consumo di corrente).

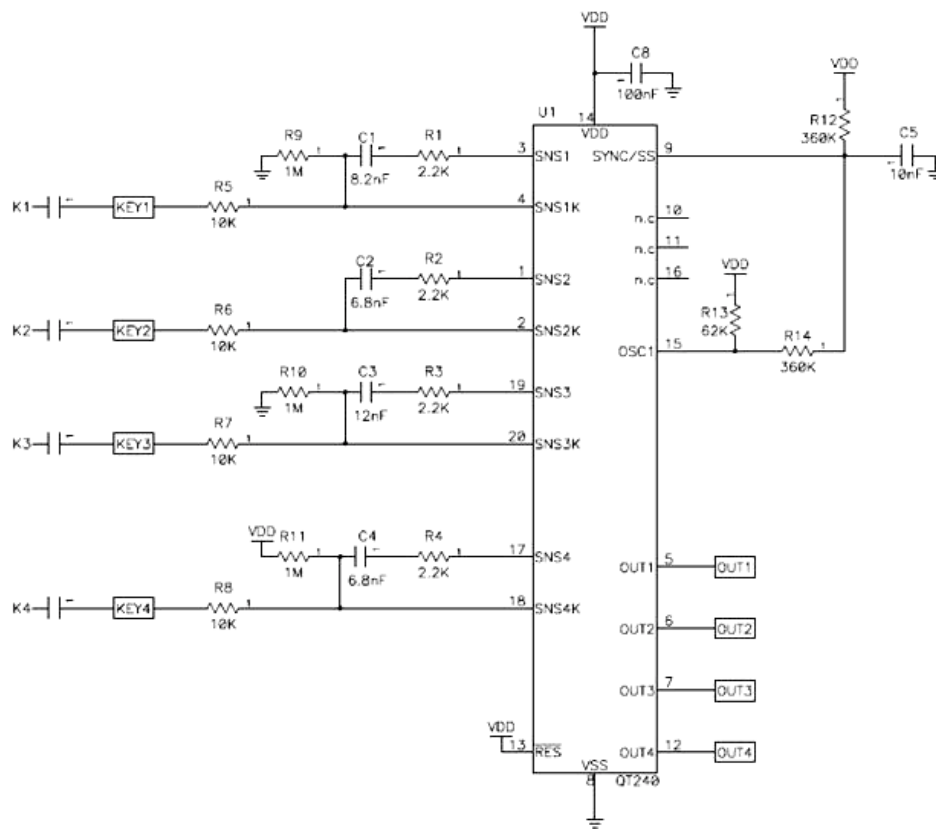


Fig. 4-4. Schema elettrico delle connessioni del IC presente sulla scheda QTouchE240 utilizzata nell'esperimento¹¹⁹

¹¹⁸ Atmel QTouch (<http://www.atmel.com/products/bsw/qtouch.asp>)

¹¹⁹ Atmel QTouch (<http://www.atmel.com/products/bsw/qtouch.asp>)

L'elettrodo (indicato con KEY1-4 in fig. 4-4) viene posizionato a valle del circuito di *matching* e può essere costituito da un conduttore generico. Nell'esperimento condotto si è cercato di adattare i circuiti di una *evaluation board* Atmel QTouch E240 alla canna sinistra dell'interfaccia, munita di elettrodi. La scheda monta un IC Atmel QT240 a quattro canali (il numero necessario a rappresentare tutti i fori digitali della canna). Il collegamento fra gli elettrodi posti sulla canna e la scheda viene effettuato per mezzo di cavi che però introducono forte instabilità nel sistema: per quanto minima, la quantità di corrente che attraversa un cavo può indurre, tramite il campo magnetico generato, un flusso di corrente che causa variazioni involontarie a quella di un cavo vicino, comportando nel IC notevoli errori nell'acquisizione dei valori in ingresso. Inoltre l'uso di cavi, specialmente se lunghi, comporta l'incremento dei valori di impedenza delle reti di *matching* e, pertanto, deve essere limitato al minimo indispensabile. Detta condizione impone la realizzazione di schede a circuito stampato (PCB) "ad hoc", posizionate all'interno di ogni canna dell'interfaccia, adiacenti agli alloggi degli elettrodi, così come si riscontra nei controller Technopipe (fig. 4-1a) e EpipE (fig. 4-3b).

Nonostante detta tecnologia risulti sicuramente la più indicata, lo sviluppo di questo sistema nel progetto richiederebbe notevoli risorse economiche. Per tale motivazione a detti sensori sono stati preferiti i più "accessibili" *push button* e in particolare quelli noti come "fine corsa". Detti componenti presentano una piccola leva per la pressione del bottone di commutazione del circuito, che conferisce loro una sensibilità particolarmente elevata anche alla minima pressione delle dita. Le dimensioni di tali componenti, non eccessive, ne permettono la facile integrazione nell'interfaccia. Con tale scelta si accetta il compromesso dell'utilizzo di una tecnologia che, per la sua natura meccanica, è più soggetta al logoramento e quindi alla sostituzione frequente.

L'illustrazione dei componenti utilizzati e dei collegamenti effettuati è riportata nella sezione Appendice A della presente tesi.

4.2.8 Il sensore per l'otre

Il secondo obiettivo della sezione relativa all'input è l'individuazione di una tecnologia adatta a misurare la pressione dell'aria sviluppata all'interno di un serbatoio d'aria (non soggetto allo svuotamento).

Per completezza viene evidenziata l'esistenza di metodi alternativi alla misurazione della pressione dell'aria. La virtualizzazione di un aerofono a sacco può non richiedere, infatti, la necessità di implementazione di un otre. In virtù della particolare tecnica di esecuzione propria delle cornamuse, nelle quali l'otre può trovare alloggio esclusivamente sotto l'avambraccio, alcune fra le

interfacce di controllo *bagpipe-like* studiate, sostituiscono interamente l'otre con un dispositivo differente. Le V-Pipes, ad esempio, integrano un simulatore di pressione dell'otre direttamente sull'apparato elettronico di base, vero cuore del sistema. Tramite questa innovativa tecnologia queste interfacce riducono al minimo indispensabile l'ingombro combinando la compattezza del sistema con la semplificazione dei suoi componenti, parametri chiave dal punto di vista dell'usabilità e dell'ergonomia. In tal modo il rilevamento della pressione non è vincolata alla presenza di un serbatoio d'aria, ma può essere operata per vie differenti. In questa direzione si sviluppa anche l'approccio effettuato nell'EpipE, che utilizza i già largamente analizzati *force sensitive resistor* per la misurazione della pressione esercitata dal braccio.

Nel progetto sviluppato, per le ragioni già esposte nella fase di costruzione del modello, si è scelto di non rinunciare alle funzionalità di un vero otre. Si passa di seguito all'analisi delle tecnologie che permettono la misurazione della pressione dell'aria all'interno del sacco.

4.2.9 Sensori di pressione

Da non confondere con i FSR, che misurano la pressione di una forza meccanica esterna applicata, questi dispositivi sono in grado di misurare la pressione esercitata dal gas o dal fluido che li circonda, generando nella maggior parte dei casi un segnale elettrico proporzionale, in virtù del principio di trasduzione su cui si fondano. La tecnologia utilizzata nella loro costruzione è diversa, così come il tipo di misurazione effettuata (pressione assoluta, relativa, differenziale, ecc.) ed il prezzo di vendita.

Sono comunemente utilizzati in applicazioni idrauliche, pneumatiche o meteorologiche ma, alcuni particolari modelli, possono trovare utilizzo anche nei meccanismi di rilevamento del fiato, come proprio nel caso dei *wind controller*¹²⁰. Fra i componenti individuati, è di particolare interesse il sensore di pressione *Air v1.2* sviluppato da InfusionSystems¹²¹, tra le cui applicazioni consigliate, è indicato il rilevamento della pressione esercitata dall'otre di uno strumento a sacco. Lo svantaggio principale di detto componente risiede nel costo che, sebbene motivato dall'accuratezza e dalla particolare completezza del sistema¹²², resta proibitivo.

¹²⁰ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.287

¹²¹ I-CubeX Air v1.2 (http://infusionsystems.com/catalog/product_info.php/products_id/60)

¹²² Questo dispositivo è parte integrante della linea di prodotti I-CubeX, studiati per applicazioni di *physical computing* di semplice implementazione. È infatti predisposto per essere alimentato da una tensione fissa di 5V DC e adattare a questa gamma dinamica di tensione il suo pieno *range* operativo (15-115 kPa o 150-1150 mBar). Inoltre, come elemento di una piattaforma completa e *user-friendly*, include la possibilità di traduzione automatica dei valori rilevati in messaggi MIDI.

4.2.10 Sensori di vibrazione

Dagli esperimenti condotti è stata individuata la possibilità di utilizzare i sensori di vibrazione piezoelettrici come misuratori della pressione d'aria circostante. Il principio di trasduzione, alla base di queste tecnologie, si fonda nella capacità di alcuni materiali come i cristalli di rispondere a una sollecitazione meccanica che ne causa la deformazione, generando una differenza di potenziale, quindi tensione elettrica, anche molto alta¹²³. Le altre caratteristiche che contraddistinguono questi sensori sono la particolare velocità di risposta, l'alta sensibilità alle vibrazioni più deboli¹²⁴ e la proprietà di invertibilità del meccanismo di funzionamento. Infatti è possibile utilizzare questi dispositivi tanto come rilevatori, ad esempio microfoni *pick-up*, quanto come emettitori, ad esempio altoparlanti. Nel caso affrontato, il rilevamento della pressione viene effettuato per mezzo di un *buzzer* piezoelettrico PT-2726PQ. Questo dispositivo, in principio emettitore, è in grado di rilevare la pressione esercitata sull'otre, generando una tensione proporzionale che nel caso specifico (come indice di riferimento è stata simulata una pressione realistica su un otre di media grandezza) corrisponde a 4.5-5V. Lo svantaggio principale nell'uso di questa tecnologia risiede nel rischio di instabilità che essa comporta. Un'eccessiva pressione sul disco del sensore, oltre che saturare i valori misurati, può causare l'alterazione del suo comportamento, determinata da successive deformazioni "di ritorno".

Le illustrazioni dei circuiti di collegamento degli input implementati sono disponibili nella sezione Appendice A.

4.3 Output

Questa sezione analizza i sistemi grazie ai quali l'interfaccia può comunicare con altri apparati e in particolare con il programma che gestisce la sintesi sonora della zampogna che, a sua volta, elabora i messaggi ricevuti dall'interfaccia e genera il suono. Nonostante il blocco di *output* sia a valle della fase di *processing*, si è optato di anticipare gli argomenti di questa sezione, nell'ottica di una più facile comprensione delle scelte effettuate in fase di scrittura del codice.

¹²³ Alcuni dispositivi sono in grado di generare tensioni tali da non richiedere l'uso di un amplificatore; al contrario, potrebbero necessitare un sistema di attenuazione.

¹²⁴ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.289-290

La prima scelta da attuare consiste nell'individuazione del tipo di codifiche e protocolli di comunicazione da utilizzare. In ogni applicazione che richieda lo scambio di messaggi da un calcolatore a un altro, il metodo di comunicazione più comunemente utilizzato, data la sua semplicità, è quello seriale¹²⁵. Nella comunicazione seriale, i messaggi sono codificati tramite pulsazioni binarie che attraversano, una dopo l'altra, un unico canale. Affinché ci sia "comprensione", però, è necessario che entrambi gli attori del processo (trasmettitore e ricevitore) vengano regolati affinché riconoscano e rispettino alcuni parametri comuni. L'insieme di queste regole costituiscono il protocollo di comunicazione e, in particolare, riguardano gli aspetti fisici del collegamento (il tipo di connessione, la tensione elettrica, il tasso di frequenza degli impulsi inviati sul canale e il metodo di raggruppamento degli stessi) e quelli logici (il tipo di messaggio inviato, la sua codifica e il suo significato). Esistono molti protocolli adatti alla comunicazione seriale, già definiti e implementabili, ognuno elaborato per uno o più tipologie di applicazioni come, ad esempio: USB, RS-232, TTL, MIDI, DMX-512, X10, UDP/IP, TCP/IP¹²⁶. Nella particolare condizione in cui si abbia il controllo della comunicazione su entrambi i lati, come nel caso del progetto che si esamina, nulla vieta la ri-definizione parziale o totale dei parametri del protocollo, creando un proprio schema di formattazione dei messaggi, l'impostazione della velocità di trasmissione dei dati o la modifica del metodo di trasporto del segnale (cablato o *wireless*); ovviamente tutto ciò nei limiti fisici del sistema.

In merito alla sincronia dei dispositivi di comunicazione, senza la quale il conteggio delle pulsazioni trasmesse e/o ricevute non può avvenire correttamente, la scelta è possibile tra fra due sole opzioni: comunicazione seriale sincrona o comunicazione seriale asincrona. Nel primo caso, il sistema richiede l'implementazione di una connessione (un canale) aggiuntiva in ogni dispositivo, dedicata allo scambio delle informazioni che riguardano il *clock* di sincronia. Su questo canale secondario viaggiano i messaggi che dettano le condizioni per le quali il ricevitore abilita la lettura sul canale principale; in tal modo il sistema è in grado di avvertire l'arrivo delle informazioni. Diversamente, la comunicazione asincrona prevede che ogni dispositivo in gioco, implementi un proprio sistema di *clock*, necessario a tenere il conteggio del tempo. Il vincolo imposto è che i dispositivi di trasmissione e di ricezione mantengano la stessa frequenza di *clock*, che viene espressa in impulsi al secondo e rappresenta la velocità di trasmissione dei dati (*data rate* o *baud rate*). L'inesistenza di un canale secondario che informi il ricevitore dell'arrivo dei dati, obbliga il dispositivo all'ascolto continuo. Questo tipo di approccio risulta il più utilizzato nei sistemi di comunicazione fra calcolatori e trova ampio riscontro nelle piattaforme di *physical computing*, nei

¹²⁵ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.137

¹²⁶ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p.138

controller musicali, nelle reti di internet, ecc. La comunicazione seriale sincrona trova invece impiego nei sistemi di comunicazione fra circuiti integrati o microcontrollori che interagiscono¹²⁷.

4.3.1 RS-232

Il protocollo più diffuso nella comunicazione seriale è sicuramente quello definito nello standard EIA RS-232. Questo tipo di protocollo è nato negli anni '60 come interfaccia fra computer e modem ed è stato utilizzato anche per il collegamento di mouse, stampante, ecc., fino all'avvento del più moderno standard USB. La presenza della porta seriale a 9 connettori definita nel RS-232 è oramai rara sui calcolatori desktop di largo utilizzo; tuttavia alcune piattaforme di *physical computing* utilizzano questo protocollo (o uno simile) per lo scambio di dati con i computer multimediali per via del suo semplice e immediato adattamento alla connessione USB¹²⁸.

La velocità imposta dalle specifiche del protocollo è variabile. Trattandosi di comunicazione seriale, quindi su singolo canale, il suo valore coincide con quello del *baud rate* del sistema e tipicamente corrisponde a 9600 bps, cioè a un valore non particolarmente alto. Gli impulsi vengono ordinati in gruppi da 8 (cioè un *byte*) che esprimono numericamente un valore da 0 a 255. Il sistema è in grado di scambiare così 1200 informazioni al secondo, cioè una ogni 0.83 msec. L'assenza di un linguaggio definito, lascia libero all'utente la possibilità di formattare secondo le proprie esigenze il contenuto dei messaggi, nei dati trasferiti, massimizzando la "personalizzazione" della comunicazione e, di conseguenza, la sua efficienza. È possibile quindi inviare informazioni in formato testuale (ad esempio tramite codifica ASCII) o suddividere un valore numerico al di fuori del *range* 0-255 in più *byte* che lo rappresentano, trasferendone separatamente le singole parti e ricombinandole in fase di ricezione.

4.3.2 MIDI

Acronimo di *Musical Instrument Digital Interface*, questo protocollo rappresenta lo standard più diffuso nella comunicazione fra gli strumenti musicali elettronici, i computer multimediali e le interfacce di controllo *real-time*, utilizzate negli ambiti di performance artistiche. A partire dalla sua definizione, risalente al 1983, ha raggiunto una diffusione commerciale praticamente universale in virtù del metodo di rappresentazione della musica che mette a disposizione¹²⁹, rimanendo peraltro

¹²⁷ D. O'Sullivan, T. Igoe - *Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers*, 2004.

¹²⁸ Questo è il caso dell'Arduino Duemilanove, utilizzato nel progetto come piattaforma di processing.

¹²⁹ V. Lombardo, A. Valle - *Audio e multimedia*, 2008. p. 227

sostanzialmente inalterato fino ad oggi¹³⁰; tuttavia, la natura delle informazioni codificate attraverso il sistema MIDI non è necessariamente vincolante all'uso del protocollo in ambito musicale, ma ne estende le possibilità di utilizzo a tutte le casistiche in cui i concetti chiave siano "interazione" e "tempo reale". Il MIDI può definirsi un protocollo completo e multilivello, in quanto cura la definizione della trasmissione dei dati su più fronti. Da una parte detta le specifiche circa gli schemi elettrici di interconnessione fra i dispositivi e le linee guida per il trasferimento dei dati e, dall'altra, specifica il linguaggio utilizzato nella comunicazione, quindi la sintassi e il significato dei messaggi scambiati¹³¹, costituendo di fatto il vero passo in avanti rispetto ai protocolli classici come il RS-232. Questa caratteristica garantisce allo sviluppatore di un'interfaccia di non dover riscrivere lo schema di interpretazione dei messaggi.

Secondo le specifiche MIDI 1.0 la trasmissione dei dati binari deve avvenire in forma seriale asincrona, alla velocità definita di 31250 impulsi al secondo¹³². Come in realtà può accadere, vi è la possibilità di sfruttare il protocollo anche tramite altri metodi di trasporto (utili a incrementare il rate di trasmissione e svincolare il sistema dal collegamento fisico), ma la tecnica standard, definita nelle specifiche sin dal 1983, prevede l'uso di porte di ingresso e di uscita interconnesse tramite cavi dedicati, i cui connettori sono generalmente di tipo DIN (maschio o femmina) a cinque poli¹³³. Le porte MIDI possono essere di tre tipi: IN, OUT o THRU. L'ultima, è utilizzata nel caso di connessione multipla, o *networking*, di più dispositivi che vengono posti in serie sfruttando la funzione "ponte" offerta da detta porta. MIDI è infatti un protocollo che permette la condivisione degli stessi cavi di collegamento e quindi gli stessi messaggi fra più interfacce di controllo che, però, non perdono la propria indipendenza (ogni dispositivo risponde solo ai messaggi a esso indirizzati). Ciò rappresenta un ulteriore vantaggio dell'utilizzo di questo sistema piuttosto che di un protocollo punto-punto, come RS-232¹³⁴.

L'uso di connettori specifici implica l'interposizione di un'interfaccia MIDI nel caso in cui il dispositivo non sia dotato di porte dedicate (questo è il caso dei microcontrollori e dei calcolatori più comuni). L'utilizzo di una scheda audio per computer separata, tipicamente dotata di ingressi e uscite MIDI, semplifica la situazione; in caso contrario, si richiederà l'uso di un dispositivo che converte i segnali in entrata e uscita sulle porte MIDI verso una porta parallela o seriale (ad esempio USB) del computer. L'interfaccia MIDI dal lato microcontrollore è facilmente realizzabile tramite

¹³⁰ Come si vedrà questa condizione ha portato alla necessità di sviluppare altri protocolli più avanzati.

¹³¹ C. Roads – The computer music tutorial, 1996. p. 972

¹³² C. Roads – The computer music tutorial, 1996. p. 976

¹³³ Di questi, però, ne vengono connessi al massimo tre

¹³⁴ D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p. 303

l'implementazione di alcuni semplici circuiti di collegamento che si frappongono fra i connettori e l'uscita seriale del dispositivo (vedi par. 4.3.8).

4.3.3 Specifiche dei messaggi MIDI

I messaggi MIDI sono codificati tramite sequenze di parole da 8 bit (un *byte*), a cui si aggiungono due bit (*start bit* e *stop bit*), rispettivamente all'inizio e alla fine di ogni sequenza¹³⁵. Il tipo di messaggio può avere un'utilità vincolata a uno specifico canale e quindi definire una particolare funzione da eseguire solo su quel canale o essere indirizzato al sistema nel suo complesso, veicolando informazioni relative al tempo o alla sincronizzazione fra più dispositivi¹³⁶. Ogni messaggio della prima tipologia (*channel message*) dovrà includere, ovviamente, le informazioni sul canale di riferimento, oltre che quelle relative alla funzione, mentre quelli della seconda tipologia (*system message*) non conterranno informazioni specifiche di canali. Ogni messaggio è composto da due o tre sequenze di parole, che possono essere classificate in due principali categorie: gli *status byte*, che identificano il tipo di messaggio e i *data byte* che contengono il messaggio vero e proprio. In quest'ottica è possibile definire lo *status byte* come l'*header* (o intestazione) di un messaggio, che viene utilizzata per identificare il destinatario e il comando da eseguire, e il *data byte* come il parametro o l'opzione del comando. La distinzione fra *status* e *data byte* viene effettuata in base al valore del primo bit (MSB o *Most Significant Bit*) di ogni sequenza, che nel primo caso risulta pari a 1 e nel secondo caso pari a 0¹³⁷. Questo fattore implica una riduzione nella gamma di valori rappresentabili limitando i *data byte* a un *range* numerico compreso fra 0 e 127, e quello degli *status byte* fra 128 e 255. Tralasciando l'analisi delle funzioni offerte nei messaggi di sistema, che non ritornano utili nell'implementazione di uno strumento di controllo che si dedica esclusivamente all'esecuzione di note musicali, si entra nel dettaglio della struttura dei messaggi di canale. Lo *status byte* è frammentato in due sottosequenze che indicano su 3 bit una fra otto categorie principali di funzioni (fra le più importanti individuiamo *Note On*, *Control Change*, *Program Change*, *Pitch Bend*) e in 4 bit il numero del canale corrispondente, che quindi è limitato a un valore massimo di 16¹³⁸. Le due sequenze successive allo *status byte* possono riferirsi a contenuti differenti, rimanendo indipendenti ed esprimendo variabili rappresentate numericamente su 7 bit oppure riferirsi,

¹³⁵ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 236

¹³⁶ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 236

¹³⁷ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 236

¹³⁸ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 237

congiuntamente, alla stessa variabile espressa su 14 bit e cioè con una risoluzione nettamente superiore.

La funzione *Note On* è quella generalmente interpretata dai sintetizzatori come comando per l'esecuzione delle note che si codifica tramite i valori esadecimali che vanno da 90 a 9F oppure quelli decimali che vanno da 144 a 159. Come innanzi riportato, le 16 possibilità corrispondono al canale di riferimento. Il *byte* seguente rappresenta l'altezza della nota, codificata secondo uno schema che assegna al Do centrale del pianoforte (Do4 con frequenza fondamentale pari a 261 Hz) il valore decimale 60 e scala tutte le altre note di conseguenza¹³⁹. La terza parola, cioè il secondo *data byte* indica il valore di *velocity* della nota suonata, cioè l'intensità corrispondente nella sua esecuzione e si esprime, come nel caso precedente, in valori decimali da 0 a 127.

La funzione *Note Off*, viene utilizzata per bloccare l'esecuzione della nota suonata tramite messaggio *Note On*; tuttavia l'utilizzo di questo comando è raro e viene spesso sostituito dall'utilizzo della stessa funzione *Note On*, a cui è associato un valore di *velocity* pari a 0. I metodi hanno apparentemente lo stesso risultato, ma nel secondo caso la codifica abbreviata risparmia la ripetizione dello *status byte* riducendo il traffico di informazioni¹⁴⁰.

I messaggi di *Program Change* inviano al dispositivo ricevente attraverso il *data byte* successivo un numero intero compreso tra 0 e 127. Di per se questo valore è semplicemente un indice e può essere interpretato nei modi più svariati. Può indicare l'attivazione di un particolare effetto sul canale corrispondente (come nei casi precedenti, identificato dagli ultimi 4 bit della prima parola ricevuta) o richiamare delle particolari configurazioni (*preset*) memorizzate nel sintetizzatore, ecc.

La funzione *Pitch Bend* è utile per esprimere l'alterazione dell'altezza di una nota suonata nei termini della frequenza fondamentale. La variazione di questo parametro è definita in un *range* di più o meno un tono della scala musicale e rappresenta il cambiamento di intonazione dovuto ad alcune tecniche di abbellimento (ad esempio il vibrato o il glissando in uno strumento a fiato)¹⁴¹. Il valore dello *status byte* è espresso da E0 (224) a EF (239) e identifica il canale, quindi le note su quel canale, da alterare. Il valore, o la quantità, di questa alterazione viene codificato congiuntamente sui due successivi *data byte*, di cui il secondo costituisce la parte più significativa (MSB), con il risultato di un *range* numerico che va da -8192 a +8191.

¹³⁹ Ogni incremento del valore corrisponde a un semitono successivo della scala musicale temperata.

¹⁴⁰ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 239

¹⁴¹ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 240

4.3.4 Limiti del MIDI

Il protocollo MIDI è di semplice e di intuitiva implementazione ed è praticamente universale; tuttavia presenta alcune importanti limitazioni che è possibile raggruppare in tre principali categorie: limiti di banda, limiti di interconnessione fra i dispositivi e limiti nella rappresentazione musicale. Si tralascia l'analisi dettagliata delle ultime due categorie limitandosi a citare solamente l'inadeguatezza del sistema a supportare più dispositivi contemporaneamente, data la mole di connessioni necessarie ed il conseguenziale calo delle prestazioni e la scarsa definizione dei parametri di intonazione nei termini della polifonia (ad es. i metodi di *pitch bend* agiscono sul canale e non sulle singole note)¹⁴². Per quanto riguarda i limiti di banda, è opportuno riportare le seguenti considerazioni. Il numero massimo delle informazioni trasmissibili attraverso una connessione MIDI standard è limitata ai 31250 impulsi per secondo, che corrisponde a un numero massimo di 3125 sequenze da 10 bit ciascuna, cioè un messaggio da tre parole ogni 0.96 msec. Da questo parametro si evince che la banda disponibile potrebbe non essere sufficiente a supportare certi tipi di performance, ad esempio se si utilizzano contemporaneamente tutti i sedici canali disponibili, con il richiamo sistematico di funzioni che rappresentano parametri di controllo continui. In queste condizioni si introduce il rischio di un ritardo troppo evidente nella successione di comandi che, invece, dovrebbero essere invocati in maniera sincrona (come ad esempio l'attacco contemporaneo di più note). Le considerazioni di Moore¹⁴³, ad esempio, ci spiegano che il solo controllo (continuo) dei valori di *pitch bend* da applicare ad un determinato canale per rappresentare l'effetto di un vibrato con frequenza di modulazione pari a 10 cicli al secondo occuperebbe tutta la banda MIDI disponibile.

4.3.5 *Open Sound Control (OSC)*

Nell'ottica di porre rimedio ai limiti imposti dall'unico standard disponibile, nell'ultimo decennio presso il CNMAT di Berkeley (California, U.S.A.), da un'idea di Adrian Freed and Matt Wright, è stato sviluppato l'*Open Sound Control*. La sua definizione originale¹⁴⁴, lo indica come un protocollo di comunicazione fra computer, sintetizzatori e altri dispositivi multimediali, ottimizzato per le

¹⁴² C. Roads – The computer music tutorial, 1996. p. 1010-1011

¹⁴³ F. R. Moore – The dysfunctions of MIDI, Computer Music Journal 12(1), 1988.

¹⁴⁴ A. Freed, A. Schmeder, M. Zbyszynski - Open Sound Control, A flexible protocol for sensor networking (<http://opensoundcontrol.org/files/OSC-Demo.pdf>)

moderne tecnologie di *networking*. Fra i vantaggi pratici si segnala la maggiore interoperabilità, accuratezza e flessibilità rispetto allo standard MIDI.

L'implementazione del OSC non è limitata al suo utilizzo nel campo musicale, ma è estesa ad altri panorami come la robotica, le performance visuali, le reti LAN di interfacce musicali o altre tecnologie assimilabili. Le principali peculiarità del protocollo sono identificabili nella migliore definizione dei messaggi che non è vincolata alla sequenza di al massimo 3 *byte* come accade nel MIDI ma assume una forma più evoluta, e nelle migliori performance del canale di trasmissione utilizzato. È agevole comprendere che l'*upgrade* a una tecnologia di trasmissione dei dati più "performante" non è opzionale ma diventa una necessità, motivata dalla maggiore quantità di informazioni in gioco.

La tipologia e la struttura dei messaggi, o meglio dei "pacchetti", di OSC 1.0 non sono predefinite, come nel MIDI, ma si prestano a personalizzazione e, in virtù della particolare codifica (assimilabile al funzionamento dei *tag* nell'XML), la loro interpretazione risulta particolarmente semplificata. Nel MIDI comandi e variabili sono espressi al massimo su due *byte* (nella realtà, come già evidenziato, la massima risoluzione di una variabile è di 14 bit) mentre in OSC le informazioni vengono rappresentate tramite stringhe di testo, numeri interi o decimali espressi su 32 bit. Un pacchetto contiene tipicamente il nome del dispositivo a cui è indirizzata l'informazione (URL) e almeno una coppia di variabili che rappresentano il tipo di comando e il suo "argomento". Un *tag*, opzionale, può associare al comando il tempo (*time code*) in cui l'evento deve verificarsi. L'utilizzo di *bundle* (cioè gruppi di pacchetti) facilita le operazioni di sincronizzazione di più eventi contemporanei e permette l'aggiornamento dei parametri riferiti a pacchetti già inviati (funzionalità non contemplate nel MIDI che è di fatto un protocollo *stateless*).

Il numero di canali utilizzabili (16 nel MIDI) è illimitato e la velocità di trasmissione dei dati raggiunge l'ordine dei Gigabit al secondo (la velocità della comunicazione è variabile in quanto strettamente dipendente dalla natura del canale di comunicazione che, come riferito, non è univoco; ad ogni modo viene identificata come maggiore di 800 Mbps¹⁴⁵).

Con le specifiche introdotte nella versione 1.1 di OSC è possibile inviare i messaggi integralmente sfruttando protocolli di trasporto come UDP/IP e reti Ethernet. L'utilizzo, invece, di protocolli di trasporto come TCP/IP sulla rete o il collegamento dei dispositivi tramite *bus* seriali, necessitano di un meccanismo di frazionamento dei pacchetti, che si effettua tramite codifica/decodifica SLIP (RFC1055). La flessibilità di questo approccio si manifesta in una vasta

¹⁴⁵ A. Freed, A. Schmeder, M. Zbyszynski - Open Sound Control, A flexible protocol for sensor networking (<http://opensoundcontrol.org/files/OSC-Demo.pdf>)

gamma di protocolli e canali di comunicazione utilizzabili: Firewire, Ethernet, USB, RS232, Serial Bluetooth, ecc.¹⁴⁶

La comparazione delle prestazioni di MIDI e OSC è, tuttavia, oggetto di dibattito¹⁴⁷. Dell'indipendenza nel MIDI fra la codifica dei messaggi e la loro tecnica di trasporto si è già riferito in precedenza. Da questo punto di vista, quindi, entrambi i sistemi possono essere equiparati e permettere alte velocità di trasmissione. Non solo; nei termini di quantità effettiva di informazione, si potrebbe affermare che il *throughput* del MIDI abbia una capacità maggiore di quello OSC, in considerazione che i messaggi vengono espressi su meno *byte*. La predefinita dei significati nel MIDI è indubbiamente svantaggiosa rispetto a OSC, tuttavia i messaggi di sistema esclusivi (*System Exclusive*), cioè quella parte di combinazioni binarie a cui non sono attualmente associati significati, possono essere personalizzati e includere anche formati quali stringhe e numeri decimali, come accade per OSC. Una delle critiche mosse al MIDI dagli sviluppatori di OSC è quella di essere inadatto agli usi al di fuori del campo musicale. Va rilevato che, invece, detto protocollo viene attualmente utilizzato anche nei campi di controllo luci, robotica e video performance.

4.3.6 Altri metodi

Per completezza di informazione va sottolineata la possibilità di utilizzo dei protocolli di comunicazione seriale esistenti, tramite altre tecniche di trasporto dei dati. Soprattutto nell'ottica di una performance artistica svincolata da connessioni cablate, evidentemente limitative oltre che esteticamente sgradevoli, una trasmissione senza fili potrebbe rappresentare la soluzione. Ciò significa che è la sola connessione fisica a mutare, lasciando la codifica dei messaggi inalterata. I due metodi generali di comunicazione *wireless* sono identificabili nelle seguenti categorie: sistemi IR (infrarossi), che richiedono un preciso allineamento fra i dispositivi di trasmissione e quelli di ricezione dei dati, che non deve essere alterato (è agevole intuire che i movimenti dell'esecutore influirebbero fortemente sul funzionamento del sistema); sistemi RF (radio frequenza), che sfruttano la modulazione del segnale su di una frequenza portante e la trasmissione via etere nell'ambiente circostante. Nell'ultima categoria ricadono i comuni sistemi di comunicazione Bluetooth e Wi-Fi (ad es. IEEE 802.11x). L'implementazione di detto sistema non è particolarmente difficoltosa in quanto esistono dei moduli abbinabili alle piattaforme di *physical computing* esistenti (ad es. Arduino) dedicati esattamente a questa funzionalità. Tuttavia la presenza di un cavo di collegamento fra interfaccia e computer non viene considerata particolarmente

¹⁴⁶ A. Freed, A. Schmeder – Features and Future of Open Sound Control version 1.1 for NIME.

¹⁴⁷ White Paper: Comparison of MIDI and OSC (<http://www.midi.org/aboutmidi/midi-osc.php>)

sfavorevole dal punto di vista dell'usabilità; pertanto l'implementazione di queste tecniche non è stata presa in considerazione.

4.3.7 Vantaggi e svantaggi

La piattaforma di programmazione utilizzata dal lato sintesi (vedi par. 5.3) offre metodi semplici e già predisposti per la ricezione dei dati in formato MIDI, oppure tramite porta seriale. Nel secondo caso va specificato però un metodo di interpretazione dei dati, a differenza del primo in cui lo standard specifica già il significato dei messaggi. Nel caso di utilizzo di OSC, è possibile installare funzioni esterne al programma che si occupano della conversione automatica dei dati ricevuti in informazioni utili per la sintesi.

In tutti e tre i casi il collegamento fisico fra microcontrollore e calcolatore può avvenire per mezzo della connessione USB, anche se il MIDI offre una possibilità aggiuntiva e cioè quella di interfacciarsi tramite una connessione dedicata. In tal modo non è necessario neppure sviluppare funzioni intermedie che si occupino dello “spacchettamento” dei dati seriali.

La particolare semplicità del MIDI, unita alla predisposizione delle piattaforme di sintesi sonora e alla semplicità di costruzione di un interfaccia di output dal lato del microcontrollore, portano alla scelta di implementarne le specifiche sia dal punto di vista della connessione fisica sia da quello del significato dei messaggi. Infatti, i parametri di controllo da implementare nell'interfaccia della zampogna non sono particolarmente sofisticati, né richiedono risoluzioni tali da rendere necessario l'utilizzo del formato OSC. In termini di occupazione della banda, non necessitando l'invocazione continua di comandi, come è invece richiesto per altre interfacce della stessa categoria, il numero massimo di operazioni a cui va garantita la sincronia si riduce a nove: nel caso in cui venga modificata contemporaneamente la posizione delle dita su tutte e tre le canne, vengono generati per ognuna di queste un messaggio di *note off* (3 byte), un messaggio di *note on* (3 byte) e un messaggio di *pitch bend* (3 byte) che, a un rate di 31250 bps, vengono eseguiti in un tempo pari a 8.64 msec, parametro considerato accettabile.

4.3.8 La porta MIDI

Il progetto dell'interfaccia di controllo della zampogna prevede un meccanismo di comunicazione monodirezionale, cioè di sola trasmissione, ed esclude la possibilità di ricezione di messaggi MIDI; non si ha quindi necessità di implementare una porta MIDI In o MIDI Thru nel sistema.

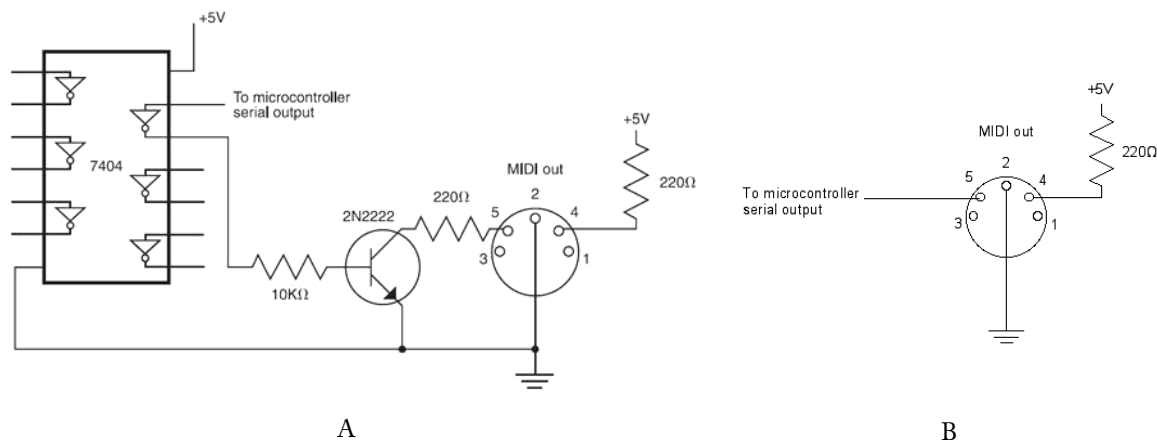


Fig. 4-5. Schemi elettrici della porta MIDI Out come da specifiche (a)¹⁴⁸ e nella versione semplificata, come indicato sul portale ufficiale di Arduino (b)¹⁴⁹

Il circuito definito nelle specifiche richiede: un connettore 5-pin DIN femmina, due resistenze da 220 Ohm e una da 10 kOhm, un transistor 2N2222 NPN, un circuito integrato 7404 Hex inverter (di cui viene utilizzata solo una porta logica). A seconda del tipo di microcontrollore utilizzato, alcuni componenti possono essere superflui; esiste infatti un'ulteriore possibilità di implementazione del circuito decisamente semplificata, che risulta ben funzionare con microcontrollori del tipo PIC, BS-2, BASIC ATOM Pro24¹⁵⁰ e con le piattaforme di *physical computing*, come Arduino. Questa configurazione traslascia il blocco costituito da inverter-transistor-resistenza, e prevede il collegamento diretto dell'uscita seriale del sistema al polo del connettore DIN.

Le immagini del circuito elettrico realizzato per l'output sono disponibili nella sezione Appendice A.

4.4 *Processing*

La scelta del microcontrollore e dell'ambiente di processamento, che di fatto rappresentano il blocco logico dell'interfaccia che si frappone fra quello di input e quello di output, è stata effettuata in considerazione dei sotto elencati parametri di valutazione:

¹⁴⁸ D.O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers, 2004, p. 304

¹⁴⁹ Arduino.cc - MIDI in Arduino (<http://arduino.cc/en/Tutorial/Midi>)

¹⁵⁰ T. Igoe - Serial communication, Midi (<http://www.tigoe.net/pcomp/code/serial-communication/midi>)

1. numero e tipologia degli ingressi: la piattaforma di *physical computing* deve necessariamente essere dotata di un numero di ingressi (analogici o digitali) tale da permettere il rilevamento dello stato di 15 sensori tattili, un sensore di pressione e un commutatore per la selezione della configurazione dello strumento;
2. ambiente di programmazione: tipologia e complessità del linguaggio con cui vengono sviluppate le funzioni di processamento dei segnali; compatibilità del sistema con le specifiche di trasmissione (*data rate*) MIDI;
3. tipologia dell'uscita: complessità di adattamento dell'uscita seriale del microcontrollore a una porta MIDI.

L'interfaccia della zampogna rientra a tutti gli effetti nella categoria dei controller MIDI; in considerazione di ciò è stata valutata la possibilità di implementarla sotto forma di dispositivo MIDIbox¹⁵¹, la cui struttura è sicuramente la più indicata.

MIDIbox è un progetto *open source* che mette a disposizione un insieme di schemi elettrici per la realizzazione di dispositivi *MIDI-based* e il *software* necessario allo sviluppo dei programmi e al loro caricamento sul dispositivo. Un dispositivo MIDIbox può sviluppare funzioni di controllo così come quelle di sintesi; in entrambi i casi si realizza tramite interconnessione di moduli hardware separati che fanno riferimento a un modulo principale (la scheda madre). Il *core module* è costituito da una scheda a circuito stampato (PCB) su cui viene montato un microcontrollore appartenente alla famiglia PIC; essa implementa i circuiti di interfacciamento MIDI (MIDI In e MIDI Out) e mette a disposizione un numero limitato di input e output analogici e digitali. Viene generalmente integrata con moduli esterni che ne estendono la memoria, gli ingressi (fino a 150), le uscite (ad es. è possibile connettere un *display* grafico), le porte di comunicazione (USB, MIDI Thru) e le funzionalità (ad es. la sintesi sonora). I progetti MIDIbox prevedono l'utilizzo di un sistema operativo specifico (MIOS) pre-caricato sul microcontrollore che si occupa del lancio di un programma finale, sviluppato dall'utente. I linguaggi di programmazione utilizzabili in fase di costruzione del programma sono C e Assembler; il software che si occupa di codificarli e trasferirli (via MIDI) dal computer al dispositivo è MIOS Studio. Nel caso in cui il programmatore scelga di adottare il linguaggio C dovrà compilare il codice prima di trasferirlo.

¹⁵¹ MIDIbox.org (<http://www.midibox.org/dokuwiki/doku.php>)

Uno dei vantaggi dell'uso di questa piattaforma è la presenza di API (librerie di funzioni) nel sistema operativo, che evita allo sviluppatore l'onere della costruzione dei messaggi MIDI da zero, per cui invece di definire un messaggio MIDI sotto forma di sequenza di *byte* e valori esadecimali è possibile fare riferimento a una funzione già presente in libreria e associarle semplici valori numerici. Lo svantaggio principale del sistema MIDIbox risiede nell'impossibilità di reperire i moduli hardware già assemblati; infatti la *community* MIDIbox mette a disposizione i disegni CAD delle schede a circuito stampato, gli schemi elettrici, le specifiche e il codice dei programmi ma, al fine di scoraggiare lo sfruttamento commerciale, non mette a disposizione moduli già predisposti all'utilizzo. Da venditori *on-line* è possibile acquistare kit che includono tutti i componenti elettrici necessari alla realizzazione dei dispositivi ma, come riferito, l'assemblaggio rimane a carico dell'utente.

La necessità di disporre di un numero di ingressi relativamente basso e la particolare capacità di adattamento della piattaforma Arduino alle specifiche tecniche richieste dal progetto, consentono di ritenere i due sistemi (Arduino e MIDIbox) pressoché equivalenti¹⁵². Potendo già disporre di una scheda Arduino assemblata e pronta all'uso, nel progetto viene data preferenza a detto sistema.

4.4.1 Arduino

Dalla definizione degli sviluppatori¹⁵³, Arduino è una piattaforma di prototipazione elettronica *open-source* che si basa su hardware e software flessibili e di facile utilizzo. Viene pensata per una moltitudine di utilizzi e utenze (fra cui designer, artisti, performer, hobbisti, etc.) con una particolare propensione verso il campo dell'interattività¹⁵⁴. Le schede Arduino (ne esistono di vari modelli) sono infatti in grado di interagire con l'ambiente circostante, ricevendo informazioni da una grande varietà di sensori, e controllare luci, motori e altri attuatori, oppure di interfacciarsi ad altri dispositivi e comunicare in un grande varietà di modi. In questo modo Arduino risulta adatto allo sviluppo di progetti *stand-alone*, tanto quanto quelli di interfaccia di comunicazione. Il microcontrollore montato sulle schede, è programmato utilizzando un linguaggio semplificato che sfrutta alcune librerie di funzioni basate sul progetto *Wiring*¹⁵⁵, facilitando così la stesura del codice

¹⁵² Anche dal punto di vista economico, una scheda Arduino Duemilanove viene venduta a un prezzo paragonabile al costo di tutti i moduli MIDIbox necessari a garantire le stesse funzionalità.

¹⁵³ Arduino.cc (<http://arduino.cc>)

¹⁵⁴ L'uso di Arduino trova ad esempio largo riscontro nelle performance di compagnie artistiche (vedi Konic Thtr, Marcel.li Antunez Roca, ecc.) che fondono le discipline motorie con l'interazione tecnologica, creando oggetti e/o ambienti multimediali strettamente dipendenti dai movimenti fisici.

¹⁵⁵ Wiring (<http://www.wiring.org.co>)

C/C++ necessario alla sua programmazione. L'ambiente di sviluppo è basato sul progetto *open-source Processing*¹⁵⁶. I punti di forza di Arduino consistono nella sua compattezza, nella semplicità del suo utilizzo e della programmazione del microcontrollore e nella completezza del suo sistema, che include già la maggior parte dei componenti elettronici necessari alle funzionalità di base e che, quindi, non necessita di integrazione con moduli aggiuntivi.

La scheda Duemilanove, ultima versione di Arduino, è di piccole dimensioni e già assemblata¹⁵⁷; è dotata di un microcontrollore ATmega328, che opera a una frequenza di *clock* di 16MHz, generata dall'oscillatore a cristallo di cui dispone. Essa è completa di tutta la componentistica necessaria per il funzionamento del microprocessore, nonché per la comunicazione da e verso l'esterno e per la regolazione dell'alimentazione¹⁵⁸. Le sue dimensioni sono pari a 7 x 5.5 cm circa e ne permettono una facile integrazione all'interno del blocco di innesto delle canne dell'interfaccia.

La scheda, che opera a una tensione nominale di 5V DC, è provvista di un regolatore di tensione che adatta i parametri dell'alimentazione esterna. È pertanto possibile alimentarla tramite trasformatore AC-DC, batteria oppure connessione USB. La dinamica di tensione supportata è di 6-20V (limiti) ma è raccomandato un valore di tensione compreso fra 7 e 12V. In questo *range* ricade il valore di una batteria da 9V che rappresenta la fonte di alimentazione utilizzata nel progetto.

La scheda Arduino Duemilanove presenta 14 piedini digitali, ognuno utilizzabile come ingresso o come uscita del microcontrollore. Alcuni di questi hanno funzioni specializzate o di *default*: il pin 13, ad esempio, in virtù del collegamento a uno dei LED montati sulla scheda, viene normalmente utilizzato per implementare *feedback* visuali, mentre i pin 0 (RX) e 1 (TX) sono dedicati alla trasmissione e alla ricezione dei dati di comunicazione seriale (di tipo TTL) da e verso il microcontrollore. Questi ultimi, infatti, forniscono una replica dei segnali che, per mezzo della conversione del chip FTDI USB-to-TTL, vengono scambiati con il computer tramite connessione USB¹⁵⁹. Ogni pin digitale opera alla tensione del sistema (5V, come nel caso della tensione nominale degli impulsi che costituiscono i messaggi MIDI). Ai sei ingressi analogici della scheda corrisponde un sistema di conversione ADC che risolve il valore misurato (0-5V dal valore di massa, nella configurazione standard) su 10 bit, ovvero con un intero compreso fra 0 e 1023.

¹⁵⁶ Processing 1.0 (<http://processing.org>)

¹⁵⁷ I progetti di riferimento dell'hardware, distribuiti con licenza *open-source*, sono consultabili e modificabili, rendendo possibile la costruzione "fai da te" della scheda ed eventuali adattamenti alle necessità individuali.

¹⁵⁸ Arduino Duemilanove (<http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDuemilanove>)

¹⁵⁹ Nella pratica, la scheda viene connessa via USB, ma comunica con il calcolatore attraverso una porta seriale COM fittizia, sfruttando il protocollo seriale RS-232 e un meccanismo di inversione dei livelli di tensione che adatta i dati TTL a quelli RS-232/USB e viceversa.

4.4.2 I/O nell'interfaccia

Nella costruzione dell'interfaccia della zampogna, sono stati utilizzati alcuni dei pin analogici come porte di input del sistema e in particolare ai pin:

- Analog 0 è stata connessa l'uscita del commutatore per la selezione delle modalità di funzionamento dell'interfaccia. Il valore della tensione all'ingresso della scheda è determinata dai circuiti di partizione implementati (v. fig. 4-6b). La selezione della modalità avviene modificando la posizione dello *switch* che, a sua volta, seleziona una particolare resistenza di partizione, determinando la variazione della tensione all'ingresso del piedino.
- Analog 1 è stato connesso il sensore piezoelettrico per il rilevamento della pressione dell'otre;
- Analog 3-5 sono state connesse le uscite digitali dei tre sensori tattili posti sulla canna del bordone. A differenza di quanto succede per i pin digitali, la natura analogica di questi ingressi implica la definizione di una soglia di tensione necessaria alla discriminazione dello stato (aperto/chiuso).

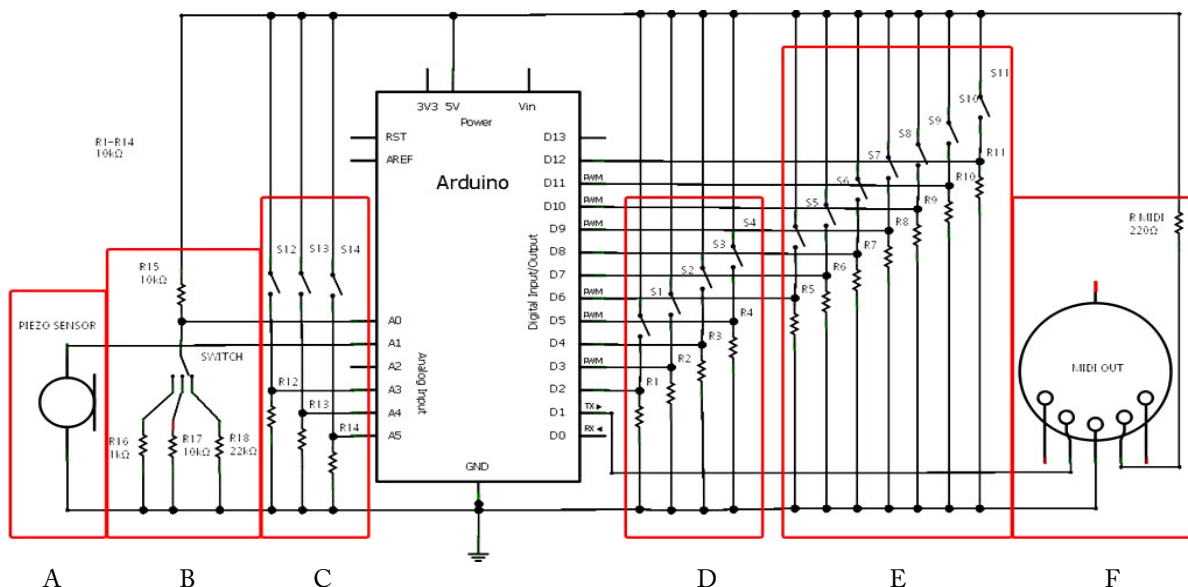


Fig. 4-6. Schema elettrico dell'interfaccia di controllo realizzata: sensore piezoelettrico per il rilevamento della pressione dell'otre (a); commutatore per la selezione delle modalità di funzionamento (b); sensori tattili della canna bordone (c), del chanter sinistro (d) e di quello destro (e); porta MIDI Out (f).

I piedini digitali che vanno da 2 a 12 sono stati utilizzati come ingressi per il collegamento dei sensori montati sulle canne del canto (destra e sinistra). Il piedino 1 (TX) è stato utilizzato come output seriale per la comunicazione dei messaggi MIDI; la funzionalità del pin 0 (RX) non è stata implementata poiché il sistema non comunica in modo bidirezionale. Il pin 13 è stato utilizzato come output visuale, in quanto ad esso è stata affidata la trasmissione della tensione necessaria per il lampeggiamento di un LED.

4.4.3 Il codice nel progetto

Per creare un programma eseguibile in ambiente Arduino è sufficiente definire due semplici funzioni: quella di *setup()*, che è utilizzata per impostare i parametri iniziali del programma e viene invocata per prima ed una sola volta, quando la scheda viene attivata, e quella di *loop()*, che viene invocata immediatamente dopo e rielaborata ciclicamente, fino a quando la scheda non viene disattivata o resettata. Quest'ultima funzione contiene, di fatto, tutti i comandi che costituiscono il programma e, pertanto, ne rappresenta la parte centrale.

Il funzionamento del programma implementato nell'interfaccia si basa su pochi concetti chiave, tanto da poter essere riassunto nei seguenti quattro punti:

1. Inizializzazione: nel metodo principale *setup()* viene invocata la funzione di *Serial.begin()* per definire il *data rate* richiesto dalle specifiche MIDI (31250 bps). Il comando *pinMode()* assegna a ogni piedino digitale il criterio di funzionamento (INPUT o OUTPUT). Nel caso di utilizzo del pin come ingresso, la lettura del valore rilevato viene effettuata per mezzo del comando *digitalRead()*; nel caso contrario è necessario utilizzare il comando *digitalWrite()*. Un esempio di scrittura di un pin digitale è riportato nel metodo *blink()*, che si occupa del lampeggiamento di un LED. Detto metodo viene richiamato selezionando la modalità di funzionamento dello strumento (vedi punto successivo) e alla fine del ciclo iniziale di *setup*, come feedback dell'avvenuto avvio del programma.

```
const int sensManca1 = 2;
const int sensManca2 = 3;
const int sensManca3 = 4;
const int sensManca4 = 5;
const int LEDpin = 13;

void setup() {
    pinMode(sensManca1, INPUT);
    pinMode(sensManca2, INPUT);
    pinMode(sensManca3, INPUT);
    pinMode(sensManca4, INPUT);
    pinMode(LEDpin, OUTPUT);
}
```

```

    Serial.begin(31250);
    blink(3);
}

void blink(int times) {
    int i;
    for (i=0; i< times; i++) {
        digitalWrite(LEDpin, HIGH);
        delay(30);
        digitalWrite(LEDpin, LOW);
        delay(30);
    }
}

```

2. Controllo del selettore della modalità: la selezione della modalità di funzionamento (zampogna a chiave, surdulina o zampogna zoppa) viene gestita dal metodo *modelCheck()*, richiamato per primo nel ciclo di *loop()*. È sufficiente implementare un numero di casi pari alle modalità previste (tre, nel presente progetto) discriminabili in base al valore della tensione rilevata in ingresso. Alla misurazione del valore (quantizzato su 10 bit), effettuata tramite funzione *analogRead()*, segue la scrittura di una variabile (numero intero compreso fra 1 e 3) e la generazione di un messaggio MIDI, corrispondente al comando di *Program Change*, necessario per comunicare al sintetizzatore l'avvenuto cambiamento della modalità. I messaggi MIDI vengono generati da un metodo al quale vengono associati due o tre valori numerici, espressi in *byte* e riferiti rispettivamente al comando MIDI, al primo e al secondo *data byte* (se previsto). Il metodo *MIDI()* provvede quindi all'invio delle informazioni sulla porta seriale e sul pin di trasmissione 1(TX) tramite la funzione *Serial.print()*. Nel caso di messaggi di tipo *program change*, questi vengono rappresentati dalla sequenza di valori esadecimali 0xC0, 0x01-0x03 (192, 1-3 nella codifica decimale). Un metodo *if* si occupa di discriminare la natura del messaggio ed eventualmente tralasciare l'invio del terzo *byte*.

3. Controllo dello stato di pressione dell'otre: come nel metodo precedente, viene rilevata la tensione elettrica (in questo caso incidente sul pin analogico 1) e implementato un meccanismo di soglia. Nella realtà pratica, è risultato necessario definire due valori di soglia in modo tale da garantire un controllo della pressione più efficiente. In tal modo si minimizza l'effetto indotto dall'estrema sensibilità del sensore piezoelettrico, evitando che una lieve variazione della pressione esercitata, soprattutto nel *range* di tensione intermedio (2-3V), possa causare l'attivazione (o la disattivazione) involontaria delle note suonate. Il metodo di controllo memorizza lo stato della pressione in una variabile binaria (*boolean*) che viene successivamente verificata. Nel caso positivo (*true*) si avvia la fase di *check* dei sensori

con la consequenziale trasmissione dei messaggi MIDI riferiti alle note; nel caso contrario l'esecuzione delle stesse viene interrotta.

```
const int pressurePin = 1;

int model = 0;
boolean pressureOn = false;
const int pressThreUp = 767;
const int pressThreDown = 256;

void loop() {
  modelCheck();
  pressureCheck();

  if (pressureOn){
    switch (model) {
      case 1:
        // Zampogna a chiave mode;
        break;

      case 2:
        // Zampogna surdulina mode;
        break;

      case 3:
        // Zampogna zoppa mode;
        break;
    }
  }
  else {
    // stop all notes!
    if (MancaPlaying != 0) {
      MIDI(0x90, MancaPlaying, 0x00);
    }
    MancaPlaying = 0;
    MancaNote = 0;
  }
}

delay(10); //fine loop, delay opzionale
}

void modelCheck(){
  int checking = analogRead(0);

  if (checking>=0 && checking<100){
    if (model != 1){
      MIDI(0xC0,0x01,0x00);
    } model = 1;
  }
  else if (checking>=100 && checking<500){
    if (model != 2){
      MIDI(0xC0,0x02,0x00);
    } model = 2;
  }
  else {
    if (model != 3){
      MIDI(0xC0,0x03,0x00);
    } model = 3;
  }
}

void pressureCheck(){

  int pressure = analogRead(pressurePin);

  if (!pressureOn){
    if (pressure > pressThreUp){
```

```

        pressureOn = true;
        blink(1);
    }
    else {
        if (pressure < pressThreDown){
            pressureOn = false;
            blink(2);
        }
    }
}

void MIDI(byte cmd, byte data1, byte data2) {
    Serial.print(cmd, BYTE);
    Serial.print(data1, BYTE);

    if (cmd != 0xC0) {
        Serial.print(data2, BYTE);
    }
}

```

4. Controllo dello stato dei sensori tattili / invio messaggi: a differenza dei metodi precedenti, il rilevamento della tensione dei sensori tattili avviene con la lettura (tramite comando *digitalRead()*) dei piedini digitali della scheda e, quindi, non risulta necessario implementare alcuna soglia di tensione. La funzione di controllo della modalità indirizza la lettura del programma al blocco di codice corrispondente (*case* 1-3) e l'esecuzione delle note viene regolata dal seguente procedimento.

A tutti i possibili *pitch* delle note¹⁶⁰ corrisponde un indice memorizzato in variabili intere (ad es. *MancaNote*, come nel codice sotto riportato) e un metodo di generazione dei messaggi MIDI corrispondenti (ad es. *mancaPlayLa2()*). Ad ogni ciclo, il programma legge gli stati dei pin associati ai sensori e ne studia la combinazione. Individuata la nota corrispondente, controlla lo stato di esecuzione corrente e agisce nel modo seguente: se alla combinazione rilevata corrisponde una nota differente da quella già in esecuzione viene generato un evento MIDI; nel caso contrario il programma passa all'analisi della canna sonora successiva. In tal modo si garantisce che la trasmissione di un messaggio MIDI non avvenga se non c'è stato un effettivo cambiamento della posizione delle dita sulla canna. I metodi che si occupano della generazione e della trasmissione dei messaggi MIDI riferiti alle note suonate hanno tutti la stessa struttura di base: il comando *digitalWrite* (HIGH/LOW), associato al connettore del LED, ne provoca l'accensione della durata pari a tempo di esecuzione del metodo (ciò per motivi di *feedback*); l'indice della nota corrente viene aggiornato e viene invocato per tre volte il metodo *MIDI()*. Il primo messaggio è del tipo *Note Off*¹⁶¹ e ha la funzione di comunicare lo stop della nota in esecuzione; il secondo comunica

¹⁶⁰ Sia quelle appartenenti alla scala sia quelle alterate (che prevedono un coefficiente che ne decrementa l'intonazione necessario per ottenere l'effetto vibrato).

¹⁶¹ Nel codice del programma si è implementato un messaggio di tipo *Note On* con parametro di *velocity* 0x00.

l'aggiornamento del valore di *pitch bend*¹⁶² sul canale della canna corrispondente; il terzo messaggio, di tipo *Note On*, dà l'avvio alla nuova nota (il coefficiente di *velocity* è pari a 0x7F ed esprime la massima dinamica). La memorizzazione di un numero di *pitch*, codificato secondo le specifiche MIDI, viene effettuata nella variabile *MancaPlaying* in formato *byte* ed è necessaria per l'interruzione della nota in esecuzione. È da evidenziare la definizione di un metodo eccezionale, attivo solo in modalità “zampogna surdulina”, che si occupa di rappresentare il comportamento della canna sinistra della zampogna in posizione “tutto chiuso”. Detto metodo differisce dai precedenti per la non-generazione di una nota, o meglio, per la generazione di un messaggio di *Note On* muto, che rappresenta il comportamento della “zeppa” montata sulla canna sonora dello strumento autentico. Per ottimizzare le prestazioni dell'interfaccia in relazione alla quantità di messaggi inviati, è stata utilizzata una funzione di controllo (*if / else*) all'interno del metodo *MIDI()* che evita la ripetizione di messaggi inutili. Detta funzione risulta particolarmente vantaggiosa nel caso di utilizzo considerevole del vibrato poiché risparmia l'invio dei messaggi di *Note Off* e *Note On*.

```
const byte vibrato = 0x35;

boolean stateManca1 = false;
boolean stateManca2 = false;
boolean stateManca3 = false;
boolean stateManca4 = false;

int MancaNote = 0;           // The indexed note playing
byte MancaPlaying = 0;      // The byte of this note

void loop() {

    stateManca1 = digitalRead(sensManca1);
    stateManca2 = digitalRead(sensManca2);
    stateManca3 = digitalRead(sensManca3);
    stateManca4 = digitalRead(sensManca4);

    // modelCheck();
    // pressureCheck();

    switch (model) {

    case 1: // Zampogna a chiave
        if (!stateManca1 && !stateManca2 && !stateManca3 && !stateManca4) {
            if (MancaNote != 11){mancaPlayRe();} // note D4
        }
        else if (!stateManca1 &&stateManca2 && !stateManca3 && !stateManca4){
```

¹⁶² È necessario sottolineare l'importanza di un corretto utilizzo di questa funzione: quando questo comando viene invocato modifica il parametro di intonazione del canale fino a un “contrordine”, cioè fino all'invocazione dello stesso comando che ne riporta il valore a 0. La condizione di neutralità non si esprime con un data byte di valore 0, ma è rappresentata dalla sequenza di interi decimali 0, 63 (o 0x00, 0x40 nella codifica esadecimale). Pertanto è risultato necessario, nel presente progetto, richiamare il comando *pitch bend* ogni qualvolta venga comunicata l'esecuzione di una nuova nota. La definizione del valore avviene generalmente su 16 bit; tuttavia è risultato sufficiente definire solo il secondo byte (MSB) assegnandogli un valore esadecimale fisso di 0x35, che, dal punto di vista musicale, comporta un alterazione di circa -32 cent. di tono, corrispondente al parametro medio di vibrato sulla zampogna. Il calcolo di questo parametro è stato effettuato sulle canne melodiche di una zampogna a chiave molisana di misura “25” e di tonalità Sol4.

```

    if (MancaNote != 10){mancaPlayRe_();} // note D4 vibrato
  }
  // some other cases...
  else if (stateManca1 && stateManca2 && stateManca3 && stateManca4) {
    if (MancaNote != 1){mancaPlaySol();} // note G4
  }
}
break;

case 2: // Zampogna surdulina
  if (!stateManca1 && !stateManca2 && !stateManca3 && !stateManca4) {
    if (MancaNote != 20){mancaPlayLa2();} // note A4
  }
  else if (!stateManca1 &&!stateManca2 && !stateManca3 && stateManca4){
    if (MancaNote != 19){mancaPlayLa2_();} // note A4 vibrato
  }
  // some other cases...
  else if (stateManca1 && stateManca2 && stateManca3 && stateManca4) {
    if (MancaNote != 50){mancaStop();} // note stop
  }
}
break;

case 3: // Zampogna zoppa
  if (!stateManca1 && !stateManca2 && !stateManca3 && !stateManca4) {
    if (MancaNote != 20){mancaPlayLa2();} // note A4
  }
  else if (!stateManca1 &&!stateManca2 && !stateManca3 && stateManca4){
    if (MancaNote != 19){mancaPlayLa2_();} // note A4 vibrato
  }
  // some other cases...
  else if (stateManca1 && stateManca2 && stateManca3 && stateManca4) {
    if (MancaNote != 11){mancaPlayRe();} // note D4
  }
}
break;
}
}
delay(10); //fine loop, delay opzionale
}

void mancaPlayLa2(){
  digitalWrite(LEDpin, HIGH);
  MancaNote = 20;

  byte Note = 69;
  if (Note != MancaPlaying){

    MIDI(0x90, MancaPlaying, 0x00);
    MIDI(0xE0, 0x00, 0x40);
    MIDI(0x90, Note, 0x7F);
    MancaPlaying = Note;

  }
  else {
    MIDI(0xE0, 0x00, 0x40);
  }
  digitalWrite(LEDpin, LOW);
}

void mancaPlayLa2_(){
  digitalWrite(LEDpin, HIGH);
  MancaNote = 19;

  byte Note = 69;
  if (Note != MancaPlaying){

    MIDI(0x90, MancaPlaying, 0x00);
    MIDI(0xE0, 0x00, vibrato);
    MIDI(0x90, Note, 0x7F);
    MancaPlaying = Note;

  }
  else {

```



```

        MIDI(0xE0, 0x00, vibrato);
    }
    digitalWrite(LEDpin, LOW);
}

void mancaStop(){
    digitalWrite(LEDpin, HIGH);
    MancaNote = 50;

    MIDI(0x90, MancaPlaying, 0x00);
    MIDI(0xE0, 0x00, 0x40);

    byte Note = 62;
    MIDI(0x90, Note, 0x00);

    MancaPlaying = Note;
    digitalWrite(LEDpin, LOW);
}

```

La parte di codice sopra riportata si riferisce esclusivamente alla rappresentazione del comportamento di una delle tre canne: il chanter sinistro (o manca). Detta canna monta sensori tattili che rappresentano il funzionamento di fori digitali non provvisti di chiave. A differenza di questa, il chanter destro e il bordone presentano fori provvisti di chiave, il cui metodo di occlusione è opposto a quello classico. Detti fori rimangono occlusi di *default* e vengono considerati aperti quando la chiave è premuta (cioè quando, a livello di interfaccia, viene rilevato il tocco del sensore corrispondente).

Nella sezione di appendice vengono illustrati gli abbinamenti sensore-ingresso della scheda di processing e le diteggiature implementate nelle canne dell'interfaccia, riferite alle varie modalità di funzionamento. Poiché la tonalità di Sol può essere considerata la più ricorrente nell'ambito della musica popolare italiana¹⁶³ i messaggi MIDI implementati nell'interfaccia fanno riferimento a questa tonalità e, in particolare, a quella di Sol4 (corrispondente alle misure “3 palmi”, “17 cm” e ”25” a seconda della modalità di funzionamento dell'interfaccia, cioè rispettivamente in caso di zampogna a chiave, surdulina e zampogna zoppa). Non è stato implementato alcun meccanismo di trasposizione della tonalità a livello *hardware* in quanto sviluppato al solo livello *software* (si rimanda al par. 5.3.2).

¹⁶³ La maggior parte degli strumenti popolari diatonici adatti alla musica d'insieme è accordato in tonalità di Sol.

Capitolo 5

Il sintetizzatore (livello II)

Come riferito nel capitolo relativo alla fase di costruzione del modello, il metodo di sintesi scelto per la simulazione del suono della zampogna è classificabile come metodo di analisi/risintesi, poiché il suo principio di funzionamento si fonda sull'analisi in frequenza di campioni sonori che rappresentano i suoni originali dello strumento, la memorizzazione di parametri che permettono di descriverne le caratteristiche spettrali e la generazione del suono sulla base di questi ultimi. Tuttavia l'approccio adottato nel progetto si differenzia sostanzialmente da quello degli algoritmi di analisi/risintesi più comunemente utilizzati per simulare gli strumenti musicali (ad es. SMS), per via della differente tecnica di estrapolazione dei parametri spettrali e del meccanismo di generazione del suono, che traggono ispirazione dalle tecniche di sintesi della voce umana basate sulla codifica per predizione lineare (LPC). In realtà il metodo utilizzato nel progetto differisce anche da quello LPC a causa di alcuni procedimenti implementati (relativi al filtraggio) che non rispettano gli standard esistenti; risulta quindi difficoltoso classificarlo in modo preciso e ci si limita ad affermare che il procedimento adottato, e di seguito descritto, rappresenta una variante della sintesi LPC.

L'organizzazione strutturale del capitolo è tale da ripercorrere la cronologia dei procedimenti che hanno portato alla realizzazione del sintetizzatore:

1. analisi del suono della zampogna;
2. generazione dei parametri necessari alla ricostruzione dei segnali;
3. programmazione del *software*.

Nell'ultima sezione del capitolo vengono riportati gli esempi di alcuni suoni artificiali ottenuti per mezzo del sintetizzatore sviluppato, e illustrate alcune considerazioni scaturenti dal confronto di questi ultimi con i suoni originali e quelli artificiali ottenuti per mezzo di tecniche di sintesi differenti.

5.1 Analisi del suono della zampogna

Lo sviluppo del sintetizzatore ha visto una fase preliminare di ricerca degli strumenti campione, la loro registrazione e l'analisi delle caratteristiche timbriche. Un ringraziamento speciale va ai suonatori e costruttori di zampogne Giuseppe Salamone di Terranova di Pollino (PZ), figlio dello storico suonatore tradizionale Carmine Salamone e a Gigi Rizzo di Monopoli (BA), che hanno messo a disposizione il loro tempo e i loro strumenti dimostrando grande interesse nei confronti di un progetto che, per via della sua natura sperimentale, può essere soggetto a critiche da parte degli zampognari tradizionalisti.

5.1.1 Il metodo di registrazione e gli strumenti campionati

Come sopra riportato, l'approccio proprio delle tecniche di analisi/risintesi è fondato sulla modellazione delle sole caratteristiche percettive dei suoni che lo strumento musicale è in grado di emettere; affinché la qualità della sintesi risulti realistica i suoni dovrebbero essere registrati in un ambiente idoneo, idealmente non riverberante, e tramite microfoni posizionati a una distanza dallo strumento pari a quella di un ipotetico ascoltatore, in modo tale che le informazioni registrate riportino le caratteristiche di irraggiamento tipiche dello strumento stesso. La ricerca effettuata è stata del tipo "sul campo", limitata in relazione alle risorse economiche e tecnologiche a disposizione. Le caratteristiche riverberanti, decisamente non trascurabili, degli ambienti utilizzati per le registrazioni hanno richiesto l'utilizzo di un procedimento particolare, illustrato in fig. 5-1 e di seguito esposto.

In primo luogo la registrazione è stata effettuata su canne separate, smontate dallo strumento e suonate per insufflazione diretta. Ogni canna sonora munita di fori digitali è stata suonata dapprima "nota per nota", in modo da garantire nella fase di analisi lo studio delle caratteristiche spettrali in condizioni di stabilità del suono; successivamente è stata eseguita una melodia

tradizionale, in modo da permettere l'analisi del comportamento dello strumento nella transizione da una diteggiatura a un'altra, con particolare riferimento agli involucri d'ampiezza (curve ADSR).

Per minimizzare l'effetto riverberante dell'ambiente i suoni di ogni canna sono stati registrati tramite due microfoni uguali JTS CX-516W a condensatore (questo modello di microfono è indicato per l'amplificazione degli strumenti a fiato), posizionati a 5-10 cm dalla parte terminale della canna (con campana, quando prevista) e dalla sezione corrispondente ai fori digitali; nel caso di canne di bordone, sprovviste di fori, la registrazione è avvenuta per mezzo di un solo microfono. Questa tecnica di registrazione, comunemente utilizzata per l'amplificazione *live* degli strumenti a fiato di tipo oboe/clarinetto, nonostante i suoi svantaggi¹⁶⁴, offre una buona resa acustica. I file sonori sono stati registrati con un tasso di campionamento di 44.1 kHz e una risoluzione di 16 bit tramite una scheda audio M-Audio Fast Track Ultra.

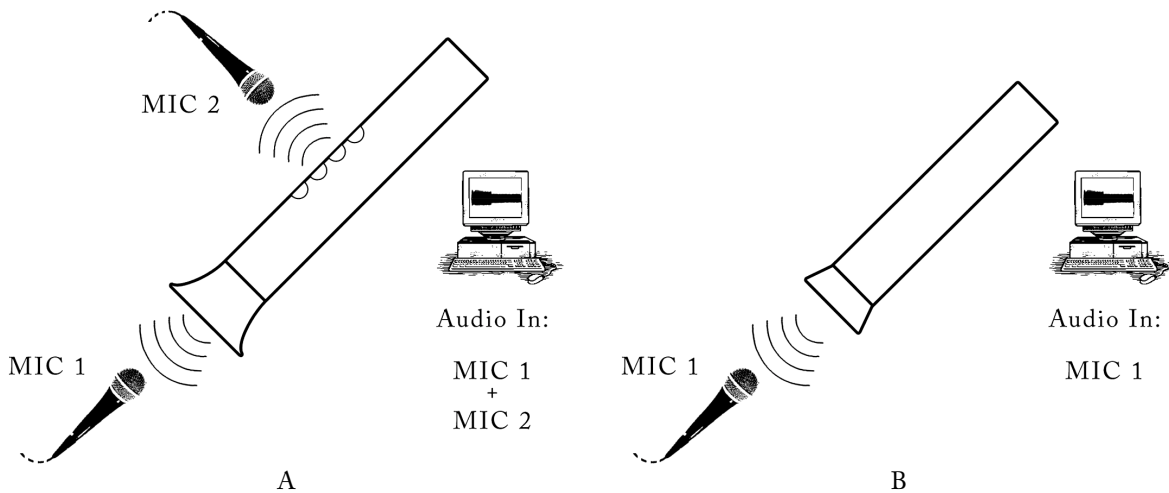


Fig. 5-1. Illustrazione della tecnica di microfonaggio adottata in fase di registrazione; i campioni riferiti ai chanter si ottengono dalla somma dei segnali provenienti da entrambi i microfoni (a), mentre per i bordone è sufficiente utilizzare il segnale di un solo microfono (b).

Sono state effettuate registrazioni di varie zampogne a chiave lucane, sia ad ancia doppia con linguette vibranti di canna naturale sia ad ancia doppia di *mylar* (un tipo di plastica particolarmente elastica), e di alcune surduline del Pollino ad ancia semplice. Poiché le ance doppie realizzate in *mylar* conferiscono allo strumento un timbro meno gradevole rispetto a quelle di canna, detti strumenti sono stati esclusi dall'analisi. In questo paragrafo e in quelli successivi, vengono riportati i dati di analisi e le osservazioni riferiti ai sotto elencati strumenti:

¹⁶⁴ Quando si miscelano i segnali provenienti da due microfoni che catturano lo stesso suono da angolazioni differenti si accetta il compromesso di introdurre alterazioni nello spettro, dovute alle differenze di fase delle componenti registrate, strettamente dipendenti dalla posizione dei microfoni e dello strumento.

1. zampogna a chiave lucana di misura 6 palmi e tonalità Sol#3, realizzata da Giuseppe Salamone;
2. zampogna a chiave lucana di misura 2_{1/2} palmi e tonalità La4, realizzata da Giuseppe Salamone;
3. surdulina del Pollino di misura “27 cm” e tonalità Fa#4, con campane incavate¹⁶⁵, di proprietà di Carmine Salamone, realizzata intorno agli inizi del XX secolo da un costruttore anonimo;
4. surdulina del Pollino di misura “16 cm” e tonalità Sol4, con padiglioni a forma di disco, realizzata da Giuseppe Salamone.

Tutti i legni adoperati nella realizzazione di dette zampogne sono riconducibili all'abbinamento ulivo-acero (v. par. 1.2.1). Per la costruzione del database implementato nel *software* sono state analizzate anche altre zampogne, sempre realizzate da Giuseppe Salamone, fra cui due surduline con padiglioni a forma di disco, di “25 cm” (tonalità Mi4) e di “14 cm” (tonalità Lab4), realizzate con legni differenti (ebano-ciliegio ed ebano-ulivo).

Poiché la fase preliminare di ricerca sul campo è stata limitata alle regioni Puglia e Basilicata e la diffusione della zampogna zoppa risulta confinata ad alcune regioni del centro Italia, non è stato possibile registrare i suoni originali di questa terza tipologia di strumento, oggetto della tesi. In considerazione delle similarità esistenti fra detto strumento e la zampogna a chiave campano-lucana, già esposte nel par. 1.2.3, le sue caratteristiche spettrali e in particolare quelle riferite al chanter sinistro, sono state ricavate tramite interpolazione dei parametri riferiti alla zampogna a chiave.

5.1.2 Algoritmi di analisi

L'analisi che è stata effettuata sui campioni sonori delle zampogne registrate può essere divisa in due tipologie:

¹⁶⁵ In fase di registrazione le campane sono state smontate dallo strumento in modo da non alterare il timbro caratteristico della surdulina che generalmente non è provvista di campane.

1. analisi nel dominio del tempo: questo tipo di studio mira a individuare i tempi medi di attacco/decadimento/sostegno/rilascio (curve ADSR) tipici dello strumento, che devono essere implementati nel *software* di sintesi tramite una funzione che conferisce al segnale generato il corretto inviluppo di ampiezza;
2. analisi nel dominio della frequenza: questo tipo di studio mira a individuare le caratteristiche spettrali tipiche di ogni canna sonora di zampogna, e va effettuata per tutte le note delle zampogne registrate. Il processo di analisi termina con l'estrapolazione di un insieme di parametri che, implementati nel processo di sintesi, permettono l'ottenimento dei timbri caratteristici dello strumento.

L'analisi nel dominio del tempo non necessita l'utilizzo di particolari algoritmi; i tempi che caratterizzano l'inviluppo di ampiezza vengono misurati direttamente dalle registrazioni effettuate con l'ausilio di programmi di *editing* audio.

Come esplicito nel cap. 2 la zampogna è uno strumento che, per via della tecnica di esecuzione e degli emettitori che utilizza, non garantisce un'effettiva dinamica di intensità sonora; ne consegue che le sue curve ADSR denotano un andamento temporale particolarmente stabile, tale da non giocare un ruolo fondamentale nella caratterizzazione (e quindi la riconoscibilità) del suono dello strumento, come invece accade per altri strumenti musicali (ad es. il pianoforte o la chitarra). Tuttavia la loro implementazione, seppur poco influente, non può essere trascurata. Poiché l'emissione sonora degli aerofoni a sacco è costante, la sezione di "sostegno" delle curve ADSR di ogni zampogna è rappresentata da una linea retta; l'analisi si focalizza così sui parametri che definiscono i tempi di attacco, decadimento e rilascio. Tranne che per alcuni casi isolati (si consideri l'uso della zeppa nella surdulina) l'esecuzione della zampogna è caratterizzata dall'impossibilità di eseguire lo staccato, pertanto i parametri di interesse sopra citati vengono implementati esclusivamente in fase di "apertura" e "chiusura" del brano.

Due esempi tipici dell'inviluppo d'ampiezza nel suono della zampogna sono illustrati in fig. 5-2. I parametri temporali raccolti vengono, invece, riportati nella tab. 5-19 del par. 5.3.7.

Lo studio che è stato effettuato nel dominio della frequenza ha necessitato l'implementazione di due differenti algoritmi di analisi (*Fast Fourier Transform* (FFT) e *Linear Prediction* (LP/LPC)). Il primo viene utilizzato per identificare le caratteristiche timbriche del suono, visualizzando graficamente il suo spettro; il secondo, invece, viene utilizzato per l'estrapolazione dei parametri necessari a ricostruirlo in fase di sintesi. La teoria matematica alla base

di tali algoritmi è ampiamente discussa in letteratura (v. Rabiner-Shafer¹⁶⁶, Wai Chu¹⁶⁷, Avanzini-De Poli¹⁶⁸, Rocchesso¹⁶⁹, Roads¹⁷⁰); in considerazione di ciò in questo paragrafo ci si limita a fornire una descrizione sommaria del loro funzionamento e del tipo di informazioni che generano. Entrambe le tipologie di studio vengono eseguite con l'ausilio delle funzioni messe a disposizione in Matlab (*fft* e *lpc*).

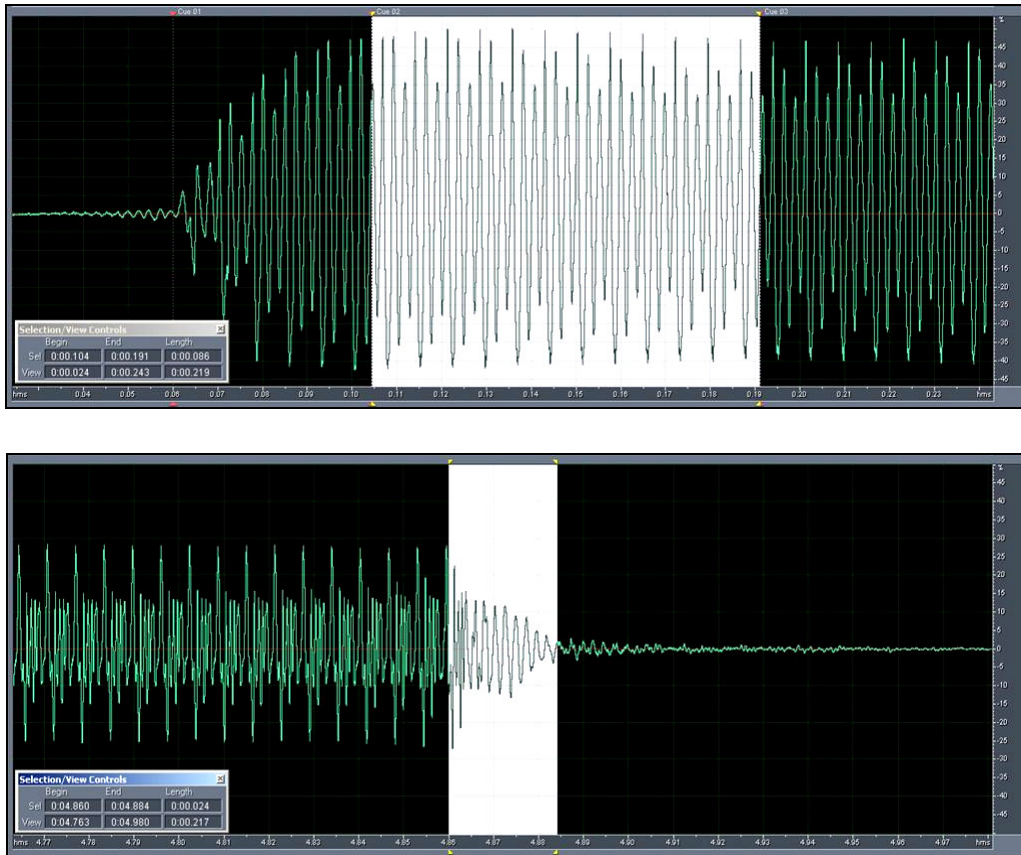


Fig. 5-2. Esempi di involuppo d'ampiezza relativo alle fasi di attacco e decadimento (a) e rilascio (b) del suono. Entrambi i campioni utilizzati sono riferiti alle note del chanter sinistro di una zampogna a chiave lucana.

Quello di FFT è una variante dell'algoritmo di *Discrete Fourier Transform* (DFT), caratterizzato dalle migliori prestazioni in termini di efficienza computazionale, che trasforma una porzione di N campioni temporali di un segnale digitale in un vettore di N elementi che esprimono i coefficienti di modulo e fase del suo spettro. Il valore numerico N costituisce la grandezza della

¹⁶⁶ L. R. Rabiner, R. W. Schafer - Digital Processing of Speech Signals, 1978

¹⁶⁷ Wai C. Chu - Speech coding algorithms: foundation and evolution of standardized coders, 2003.

¹⁶⁸ F. Avanzini, G. De Poli - Algorithms for Sound and Music Computing, Fundamentals of digital audio processing, 2005-2008

¹⁶⁹ D. Rocchesso - Introduction to sound processing, Chapter 4, Sound Analysis, 2004.

¹⁷⁰ C. Roads - The computer music tutorial, 1996.

“finestra” della FFT e determina la risoluzione dello spettro: all’aumento delle dimensioni della finestra corrisponde l’aumento del numero di bande di frequenza in cui esso viene suddiviso; pertanto, la qualità della conversione è strettamente legata a una corretta definizione di tale valore.

Generalmente l’analisi del suono degli strumenti musicali viene effettuata utilizzando finestre dalle dimensioni non eccessive (ad es. da 512 o 1024 campioni) poiché è necessario preservare le caratteristiche di tempo-varianza dello spettro. Come illustrato da Serra¹⁷¹, in relazione ai parametri di analisi utilizzati nella tecnica SMS, per analizzare la componente deterministica di suoni armonici e stazionari è consigliabile utilizzare una finestra dalle dimensioni maggiori, che catturi un gran numero di periodi dell’onda e garantisca una migliore definizione dello spettro. I campioni sonori della zampogna evidenziano un comportamento spettrale particolarmente stabile e risultano “armonici” (cioè privi di componenti inarmoniche, tipiche dei suoni percussivi); pertanto si è adottato un valore di *FFT size* (o *window size*) pari a 8192 campioni.

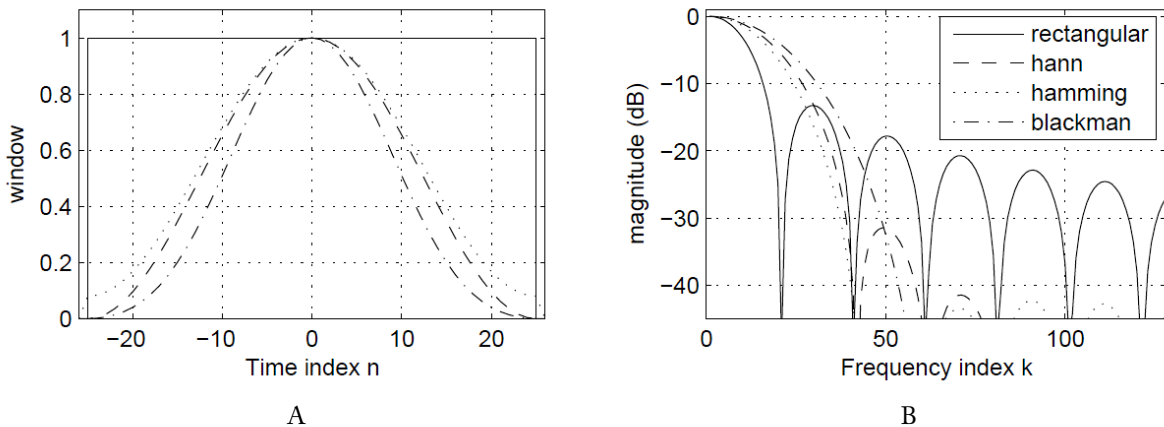


Fig. 5-3. Comparazione di differenti funzioni di finestramento¹⁷²; l’involuppo d’ampiezza delle finestre (a) è simmetrico rispetto all’indice $n=0$; le differenze in termini di ampiezza del lobo centrale (in corrispondenza dell’indice $k=0$) e dei relativi lobi laterali delle diverse finestre (b) sono evidenti: mentre il livello dei lobi laterali di una finestra rettangolare misura -13.3dB , quello delle finestre di Hann (o Hanning), Hamming e Blackman misura rispettivamente -31.5dB , -42.7dB e -58.1dB ¹⁷³.

Un altro importante parametro da considerare nell’analisi in frequenza è quello relativo al tipo di finestra, cioè al tipo di involuppo d’ampiezza assegnato al segnale in ingresso della FFT (tramite moltiplicazione dei campioni per i coefficienti della finestra). Il processo di finestramento del segnale digitale originario introduce un fattore di distorsione nella rappresentazione dello

¹⁷¹ X. Serra – Musical Sound Modeling with Sinusoids plus Noise, 1997

¹⁷² F. Avanzini, G. De Poli – Algorithms for Sound and Music Computing, Fundamentals of digital audio processing, 2005-2008

¹⁷³ D. Rocchesso – Introduction to sound processing, Chapter 4, Sound Analysis, 2004.

spettro, causando il fenomeno del *leakage* (l'energia relativa a una componente dello spettro viene rilevata anche nelle bande adiacenti). Tale fenomeno, riconducibile a una perdita di definizione dello spettro, può essere ridotto tramite l'utilizzo di funzioni di finestramento il cui involuppo è di tipo "campana" (*bell-shaped*); tali finestre garantiscono la concentrazione dell'energia della componente spettrale nella banda di riferimento (o lobo centrale) e riducono l'energia dei lobi laterali (v. fig. 5-3*b*). Fra le più indicate si menzionano la funzione di Hamming, quella di Hanning e quella di Blackman (v. fig. 5-3*a*). In particolare per il finestramento dei campioni della zampogna viene utilizzata la funzione di Blackman-Harris92dB (che attenua il livello dei lobi laterali a -92dB), che è quella implementata in fase di analisi nella tecnica SMS (in rete è disponibile il SMS *tool* per Matlab¹⁷⁴).

Il metodo di analisi/risintesi per predizione lineare (LPC) è una delle tecniche più efficacemente utilizzate nella sintesi della voce umana: esso si basa sull'assunto che sia possibile simulare i suoni vocali (ma non solo) attraverso un filtraggio che riproduca le caratteristiche filtranti del tratto vocale. Il processo di analisi proprio di questa tecnica comprende quattro fasi distinte: determinazione dell'involuppo spettrale, rilevazione della frequenza fondamentale, rilevazione dell'energia del segnale (RMS *amplitude*), determinazione del segnale di eccitazione (armonico o inarmonico).¹⁷⁵ In considerazione che, così come illustrato di seguito, questa tecnica è stata implementata esclusivamente per individuare i parametri delle formanti che caratterizzano il timbro del suono della zampogna, ci si limita a descrivere il processo di analisi relativo alla prima fase (determinazione dell'involuppo spettrale).

L'analisi LPC sfrutta la correlazione esistente fra i valori dei campioni di un dato segnale, ognuno dei quali viene stimato sul valore di uno o più campioni precedenti; è possibile quindi "predire" il campione n -esimo del segnale $x(n)$ dalla combinazione lineare dei precedenti P campioni, più un valore residuo corrispondente all'errore di predizione.¹⁷⁶

$$x(n) = -a_1x(n-1) - a_2x(n-2) - \dots - a_Px(n-P) + e(n) . \quad (5.1)$$

I valori dei coefficienti a_1, \dots, a_P rappresentano i parametri per la definizione di un filtro "inverso", cioè quello che descrive l'involuppo spettrale del segnale analizzato "al negativo" (v. fig. 5-4*a*). Nel dominio della frequenza l'equazione (5.1) si riduce a

¹⁷⁴ Spectral Modeling Synthesis Tools – Music Technology Group (<http://mtg.upf.edu/technologies/sms>)

¹⁷⁵ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 196-197.

¹⁷⁶ D. Rocchesso – Introduction to sound processing, Chapter 4, Sound Analysis, 2004.

$$E(z) = A(z) X(z) . \quad (5.2)$$

dove $A(z)$ è il polinomio con i coefficienti a_1, \dots, a_P . Il processo di inversione del filtro ($1/A(z)$) genera il cosiddetto *allpole formant filter* perché, scelto un certo ordine P (LPC order), la sua risposta in frequenza rispecchia l'involuppo spettrale del segnale originale, evidenziandone le risonanze caratteristiche (o formanti).¹⁷⁷ I paragrafi seguenti riportano i dati relativi allo studio (tramite FFT e LPC) dei suoni di zampogna registrati, con le dovute osservazioni; nel par. 5.2 viene illustrato nel dettaglio il metodo di estrapolazione dei dati e il tipo di algoritmo di sintesi implementato, che risulta differente da quello proprio della tecnica di risintesi LPC.

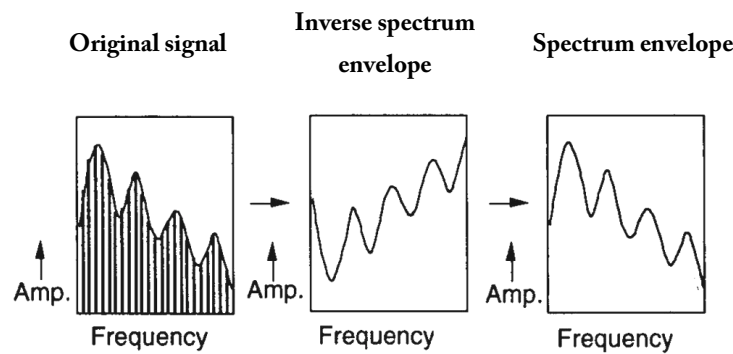


Fig. 5-4. Schema di funzionamento dell'analisi LPC: determinazione del filtro inverso e del filtro delle formanti.¹⁷⁸

5.1.3 Osservazioni I

I grafici riportati di seguito illustrano gli spettri di frequenza (il solo modulo) di alcune note di differenti zampogne, le cui sequenze di campioni, estratte dalle registrazioni effettuate, sono state salvate in file audio separati (di tipo “.wav” MONO, con tasso di campionamento di 44.1 kHz e risoluzione di 16 bps). Ogni file contiene le informazioni temporali relative più periodi dell'onda sonora (il numero di campioni memorizzati è sempre superiore a 8192); ogni sequenza è stata estratta dalle sezioni in cui il segnale è risultato più stazionario. Per ogni nota registrata sono stati isolati da uno a quattro file audio, in modo da ovviare alle eventuali variazioni dello spettro causate dall'eccitazione delle ance non sempre perfettamente costante; in tal modo le valutazioni sul timbro della nota sono state effettuate comparando più spettri di frequenza. Come precedentemente riferito, l'analisi è stata effettuata tramite l'utilizzo delle funzioni di FFT e LPC, che permettono di

¹⁷⁷ D. Rocchesso – Introduction to sound processing, Chapter 4, Sound Analysis, 2004.

¹⁷⁸ Rielaborazione da C. Roads – The computer music tutorial, 1996.

visualizzare la distribuzione delle armoniche dei segnali e, nello stesso grafico, l'involuppo spettrale e le sue formanti. Affinché l'involuppo rappresenti in modo accurato la distribuzione spettrale, l'ordine di predizione deve essere attentamente scelto. Gli spettri delle note più acute (ad es. quelle di una surdulina di piccole dimensioni), che contengono un minor numero di componenti armoniche in banda udibile e, quindi, minor numero di formanti, vengono ben rappresentate da involuppi generati da ordini di predizione bassi (10-20); al contrario, le note più gravi (ad es. quelle di una zampogna a chiave di grandi dimensioni) necessitano di un ordine di predizione maggiore (30-50), in modo tale da identificare un gran numero di formanti dello spettro.

Dal confronto degli spettri relativi ad alcune note (quelle che mostrano le differenze più significative) è possibile effettuare alcune considerazioni. Il grafico in fig. 5-5a è relativo alla nota Si4 eseguita sul chanter destro (ritta) della zampogna a chiave $2\frac{1}{2}$ palmi; quello illustrato in fig. 5-5b è riferito alla nota di La#4, eseguita sul chanter destro della surdulina "16 cm". Le due note hanno valori di *pitch* vicini e fanno riferimento a una posizione intermedia dell'estensione della canna sonora; ciononostante la differenza fra i timbri è apprezzabile: la caratteristica più evidente della nota della zampogna a chiave è l'attenuazione delle prime componenti spettrali e, in modo particolare, della frequenza fondamentale; i picchi dello spettro in fig. 5-5a si concentrano nelle regioni corrispondenti alla 3°, alla 5°-6°, alla 8°-9° e alla 12° armonica. Il timbro della surdulina non presenta le stesse caratteristiche: come si evince dal grafico riportato in fig. 5-5b, i picchi del suo spettro sono concentrati nelle regioni corrispondenti alle prime due componenti (fondamentale e 2° armonica), alla 8°-9° e alla 22° armonica, lasciando un vuoto evidente nelle regioni che, invece, risultano più significative per il timbro della zampogna a chiave. Ciò è dovuto alla diversa tipologia del corpo risonante che nella zampogna a chiave ha profilo tronco-conico mentre nella surdulina è cilindrico. Ma non solo: l'attenuazione della fondamentale e delle prime componenti armoniche, nella zampogna a chiave, è dovuta alla presenza di una campana (più o meno svasata) che, come riferito nel cap. 2, conferisce al timbro un effetto di tipo filtro passa basso (HPF); tale campana non è presente nella surdulina che, quindi, possiede un timbro più delicato e meno "nasale".

Dall'analisi effettuata si osserva la presenza, nello spettro della surdulina, di tutte le componenti armoniche (pari e dispari); quanto rilevato si discosta dalla tesi avanzata nel cap. 2, secondo la quale le cavità risonanti cilindriche tenderebbero ad attenuare le armoniche pari. In considerazione di ciò non è necessario implementare differenti metodi di sintesi, potendo adottare un unico metodo valido per tutti i tipi di corpo risonante.

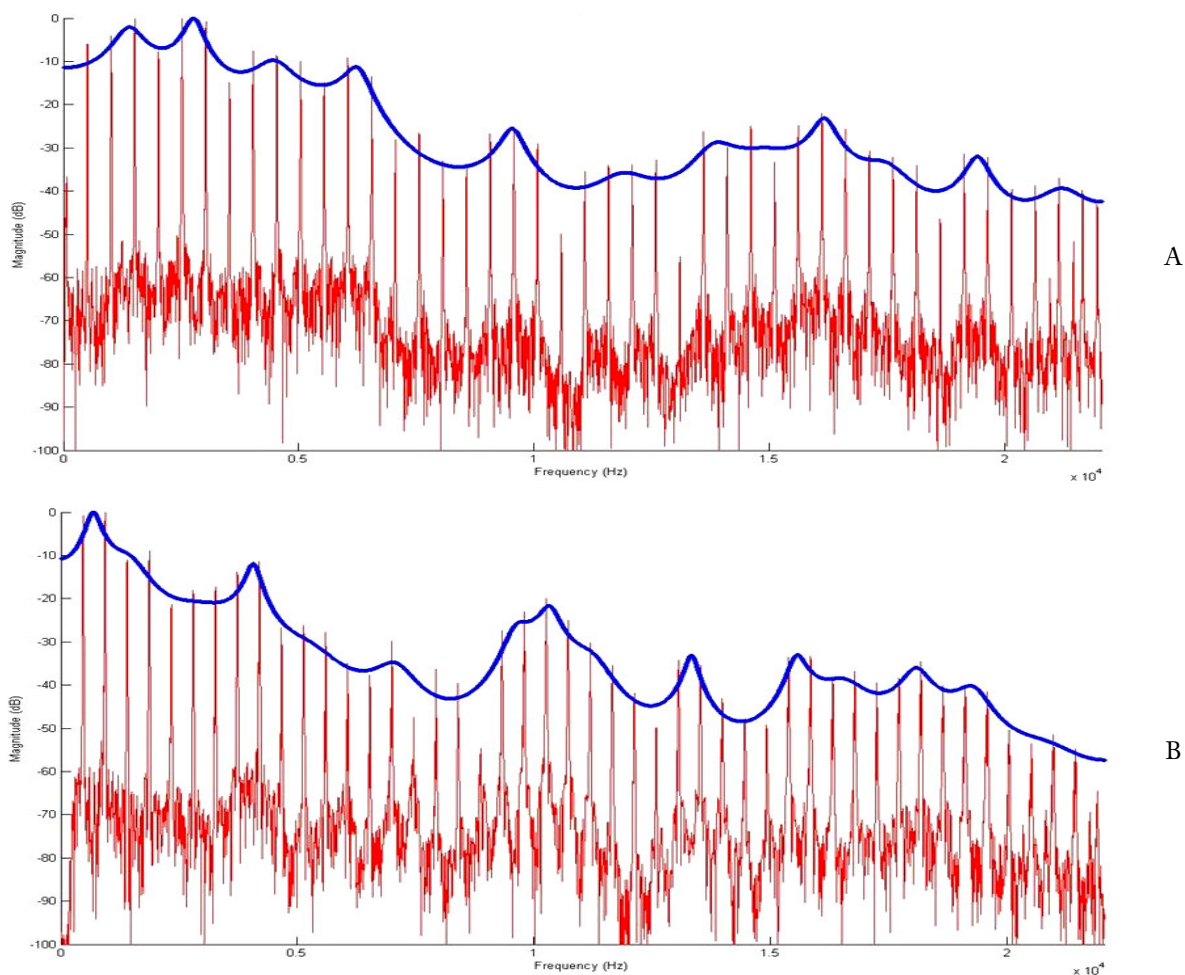


Fig. 5-5. Spettri di frequenza (modulo) delle note: Si4 eseguita sul chanter destro (ritta) della zampogna a chiave $2\frac{1}{2}$ palmi di G. Salamone in La4 (a); La#4 eseguita sul chanter destro (ritta) della surdulina “16 cm” di G. Salamone in Sol4 (b). I grafici sono generati tramite normalizzazione delle funzioni di FFT e LPC di ordine 30.

5.1.4 Osservazioni II

Dal confronto degli spettri di differenti note della zampogna e, in particolare, di quelli relativi alle note eseguite dalla stessa canna sonora, emergono dati interessanti, che consentono di comprendere le modalità di formazione del timbro all’interno della canna sonora e, quindi, di definire dei modelli spettrali implementabili nel programma di sintesi. Nel primo esempio, illustrato in fig. 5-6, vengono confrontati gli involucri spettrali delle note del chanter sinistro della zampogna a chiave $2\frac{1}{2}$ palmi. Si osserva come le frequenze di risonanza della canna sonora giochino un ruolo fondamentale nella creazione del timbro di ogni nota: a prescindere dal *pitch* della nota suonata, i coefficienti delle formanti principali risultano, con le dovute approssimazioni, invariati. Tale

comportamento risulta evidente per le prime 3-4 formanti dello spettro, che sono quelle con maggior concentrazione di energia (*range* 0-40dB) e, quindi, le più influenti nel processo di formazione del timbro; esso lo è meno per le formanti successive, che però, a causa del basso livello di energia (-30-0dB), possono considerarsi trascurabili in termini di caratterizzazione del timbro.

Tale comportamento, che è stato riscontrato nella maggioranza dei casi analizzati (a scopo illustrativo vengono riportati in fig. 5-7 e 5-8 gli involuپی di altre canne sonore, relativi rispettivamente al chanter destro della zampogna a chiave 6 palmi e al chanter destro della surdulina “27 cm”), consente di avanzare l’ipotesi che la definizione, per ogni canna sonora, di un unico involucro spettrale (generato dalla media degli involuپی di ogni nota) sia in grado di generare, in fase di sintesi, il timbro di tutte le note eseguite sulla canna. Quanto osservato trova riscontro nello studio di Fransson (1966), che analizza il timbro del fagotto (aerofono ad ancia doppia, imparentato con l’oboe) sulla base dell’involucro spettrale di un segnale costituito dalla rapida successione di alcune note dello strumento¹⁷⁹; come per la zampogna, le formanti che caratterizzano il timbro non dipendono dalla nota suonata ma dall’accoppiamento canna-emettitore.

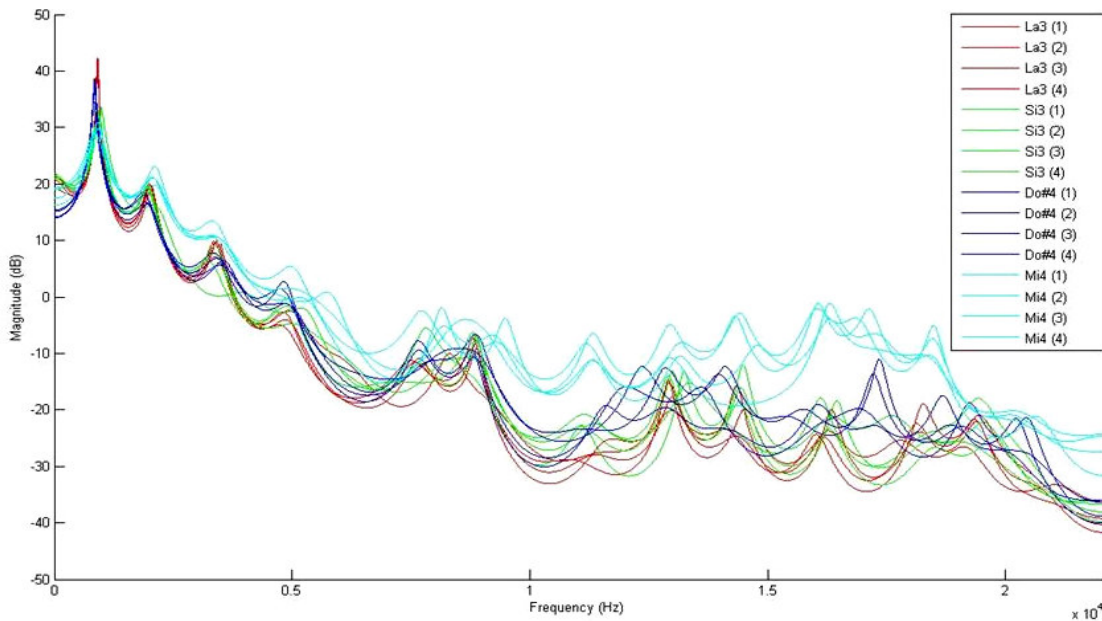


Fig. 5-6. Involuپی spettrali (generati tramite LPC di ordine 30) delle note del chanter sinistro (manca) della zampogna a chiave $2\frac{1}{2}$ palmi di G. Salamone in La4.

¹⁷⁹ F. Fransson – The source spectrum of double-reed wood-wind instruments

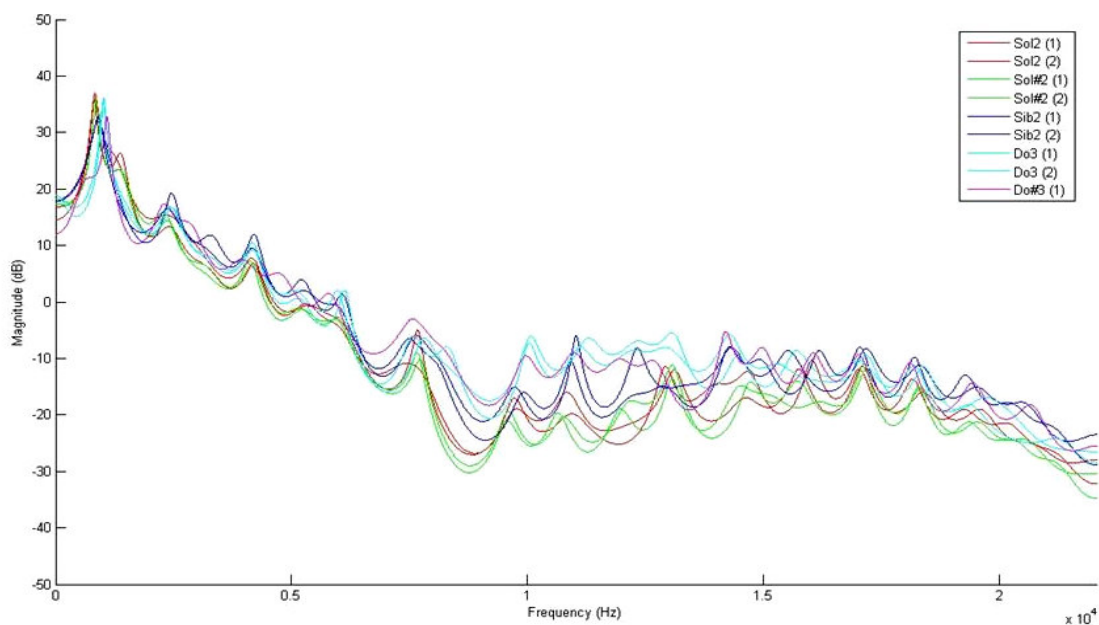


Fig. 5-7. Involuppi spettrali (generati tramite LPC di ordine 45) delle note del chanter destro (ritta) della zampogna a chiave 6 palmi di G. Salamone in Sol#3.

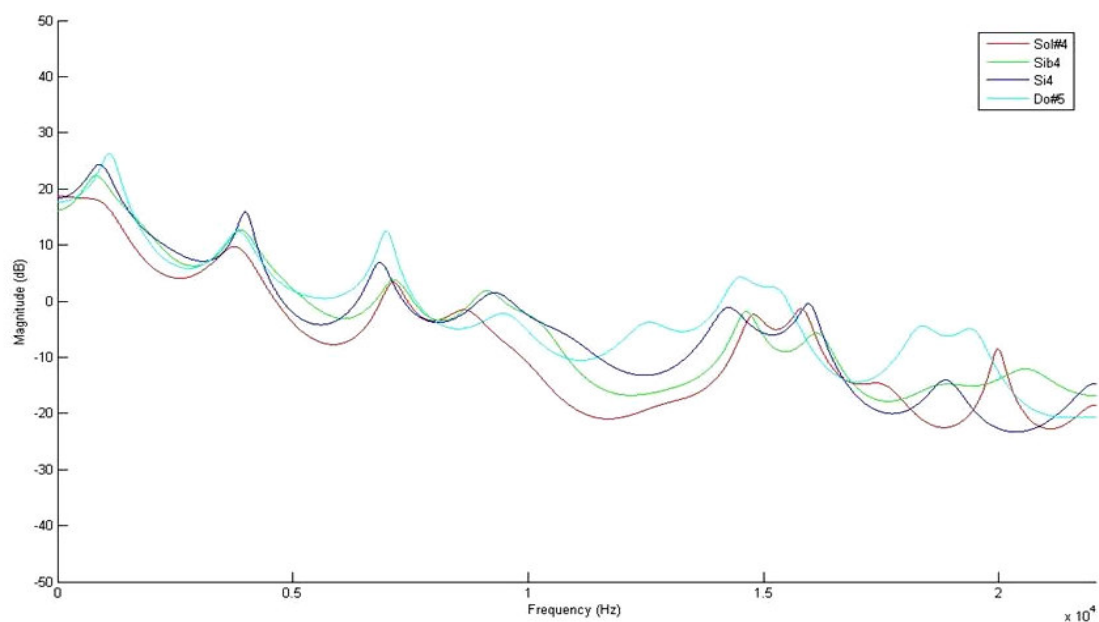


Fig. 5-8. Involuppi spettrali (generati tramite LPC di ordine 25) delle note del chanter destro (ritta) della surdulina “27 cm” di G. Salamone in Fa#4.

Dal confronto delle caratteristiche spettrali di più canne sonore (v. fig. 5-9), uguali per tipologia ma differenti per dimensioni, si osserva l'esistenza di tratti comuni negli involuppi, che potrebbero consentire la generazione di un “modello” spettrale unico e scalabile, in grado di rappresentare tutti i timbri delle note della canna sonora in modo indipendente dalle sue dimensioni

e, quindi, dalla tonalità di riferimento. Tuttavia, la definizione di un involuppo spettrale univoco, costruito sulla media degli involuppi di canne sonore appartenenti a un'unica tipologia (affinché sia possibile evidenziare le caratteristiche comuni, gli involuppi di canne di dimensioni differenti devono essere opportunamente scalati in frequenza), introdurrebbe nel sistema approssimazioni non accettabili che genererebbero una sintesi sonora non realistica. In considerazione di ciò è stata scartata l'ipotesi di generazione di modelli univoci, optando per l'adozione di più modelli spettrali per ogni tipologia di canna (il numero dei modelli è correlato al numero di zampogne analizzate). Tali modelli vengono adattati alle varie tonalità dello strumento sintetizzato tramite un processo di trasformazione dei coefficienti, basato sulla trasposizione in frequenza dei parametri spettrali, permettendo la conservazione del timbro della canna sonora nel passaggio da una tonalità ad un'altra (lo stesso criterio di trasposizione viene implementato nelle tecniche di sintesi per *wavetable* utilizzate per la simulazione del suono della cornamusa¹⁸⁰).

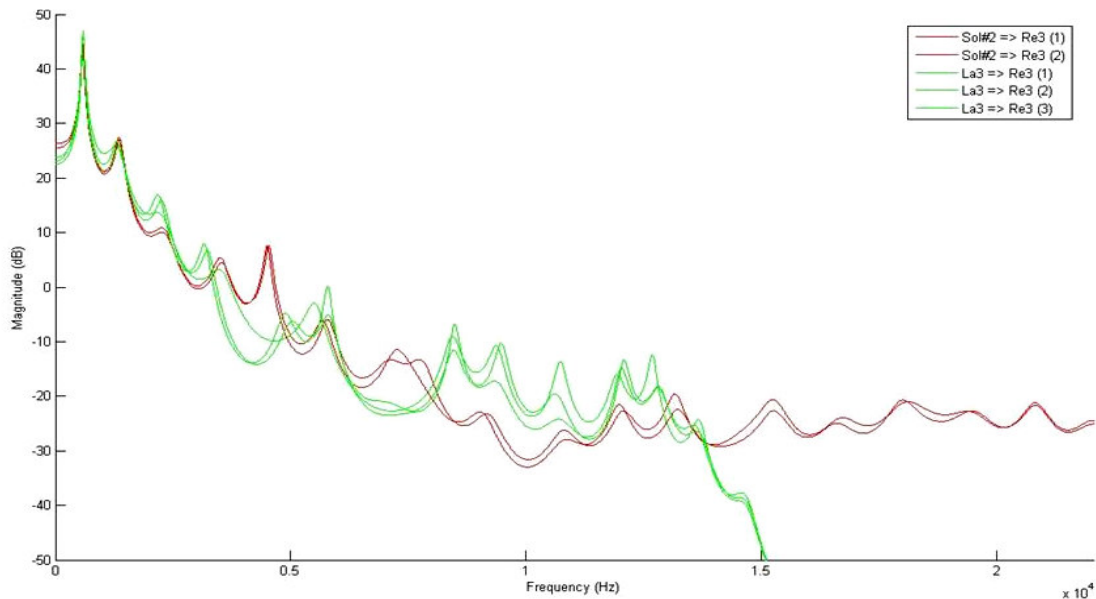


Fig. 5-9. Confronto degli involuppi delle note Sol#2 e La3, eseguite sulla stessa tipologia di canna sonora (chanter sinistro di zampogna a chiave rispettivamente di misura 6 e $2\frac{1}{2}$ palmi) e riferite alla stessa posizione nella scala (tonica). Affinché i due spettri possano essere confrontati, le frequenze fondamentali dei due segnali devono coincidere; pertanto viene effettuato un processo di *pitch shift* che, tramite *upsampling/downsampling* dei campioni audio temporali, trasla le caratteristiche spettrali e porta il *pitch* di entrambi i segnali a Re3. Poiché le proporzioni dell'ancia e della canna sonora si mantengono col variare della tonalità, le formanti più influenti (le prime 3-4) nella caratterizzazione del timbro coincidono. L'assenza delle componenti spettrali dai 13 kHz in su, nello spettro della nota La3, è causata dal processo di sovracampionamento del file audio.

¹⁸⁰ Nei sintetizzatori per cornamusa il numero di *wavetable* disponibili nel sistema è limitato al numero delle note di una canna sonora; poiché generalmente non si dispone di un numero di *wavetable* tale da rappresentare tutte le note di ogni possibile tonalità dello strumento, i timbri “mancanti” vengono ottenuti proprio tramite ricampionamento delle tabelle disponibili. Il processo di ricampionamento corrisponde alla trasposizione in frequenza del timbro e genera un risultato realistico.

5.2 Algoritmo di sintesi

Come riferito in precedenza, la tecnica LPC genera una stima dell'involuppo spettrale del segnale analizzato; i parametri ricavati possono essere utilizzati per definire il filtro digitale necessario per implementare la tecnica di sintesi sottrattiva. Il segnale sintetico viene costruito, infatti, tramite filtraggio di un segnale di partenza, dotato di uno spettro molto ricco, che rappresenta la fonte di eccitazione del sistema.¹⁸¹ Poiché i suoni della zampogna sono totalmente armonici e l'implementazione di componenti residue (equivalenti alla parte stocastica nella tecnica SMS) può essere tralasciata¹⁸², il segnale di eccitazione risulta univoco e corrisponde al treno di impulsi (o IT, dall'inglese *impluse train*).

La differenza fra l'algoritmo di sintesi LPC e quello adottato nel sintetizzatore della zampogna risiede nella tipologia del filtro implementato. Nella tecnica LPC i coefficienti estratti costituiscono i parametri di implementazione di un filtro digitale di tipo FIR, che opera nel dominio del tempo. Nel programma di sintesi realizzato, invece, si adotta un filtraggio nel dominio della frequenza (*FFT filtering*), che richiede la conversione del filtro LPC (*allpole formant filter*) in un vettore di N elementi (pari a 4096 nel caso specifico), che rappresentano i livelli di energia di ogni banda dello spettro. Il processo di conversione dei parametri avviene in Matlab, tramite funzione *freqz*, e si conclude con l'esportazione di un file ".wav" 32 bit *floating point* (tale codifica mantiene pressoché inalterati i valori, evitando processi di scalamento, e ne garantisce la facile importazione nel programma di sintesi). Tale implementazione del filtraggio permette la trasposizione in frequenza dei parametri spettrali tramite ricampionamento (*upsampling/downsampling*) del vettore, che viene trasformato in funzione della frequenza della tonalità dello strumento sintetizzato e di quella della canna sonora originale, dal quale il vettore è stato generato. Il rapporto fra le due frequenze stabilisce il coefficiente di scalamento del vettore FFT.

Il metodo di fusione degli involuppi spettrali di una canna sonora, che permette la generazione di un unico filtro FFT, viene effettuato secondo il seguente procedimento:

¹⁸¹ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 197.

¹⁸² L'emissione sonora continua, propria degli aerofoni a sacco, minimizza la formazione di rumori aggiuntivi, caratteristica imprescindibile degli aerofoni ad ancia più comuni (clarinetto, oboe), apprezzabile nei transitori d'attacco. Il segnale residuo nella zampogna si riduce al rumore dell'aria all'interno della canna risonante e può essere sintetizzato tramite generazione di rumore bianco e successivo filtraggio. In considerazione che tali componenti inarmoniche vengono mascherate da quelle armoniche (a maggiore energia), non risultando quindi percepibili, la loro implementazione nel sintetizzatore può essere tralasciata.

1. generazione delle trasformate FFT (individuali) delle sequenze di campioni sonori (una o più sequenze da 8192 campioni per ogni nota);
2. media delle trasformate FFT, effettuata per ogni banda (*bin*) tramite somma delle componenti “complesse”;
3. generazione della trasformata inversa iFFT, e finestramento (tramite funzione di Blackman-Harris) del segnale ottenuto;
4. codifica LPC del segnale finestrato ed esportazione dell’involuppo spettrale (il solo modulo) nel vettore di N elementi che costituisce il filtro FFT.

Il procedimento completo di analisi/risintesi adottato è illustrato in fig. 5-10.

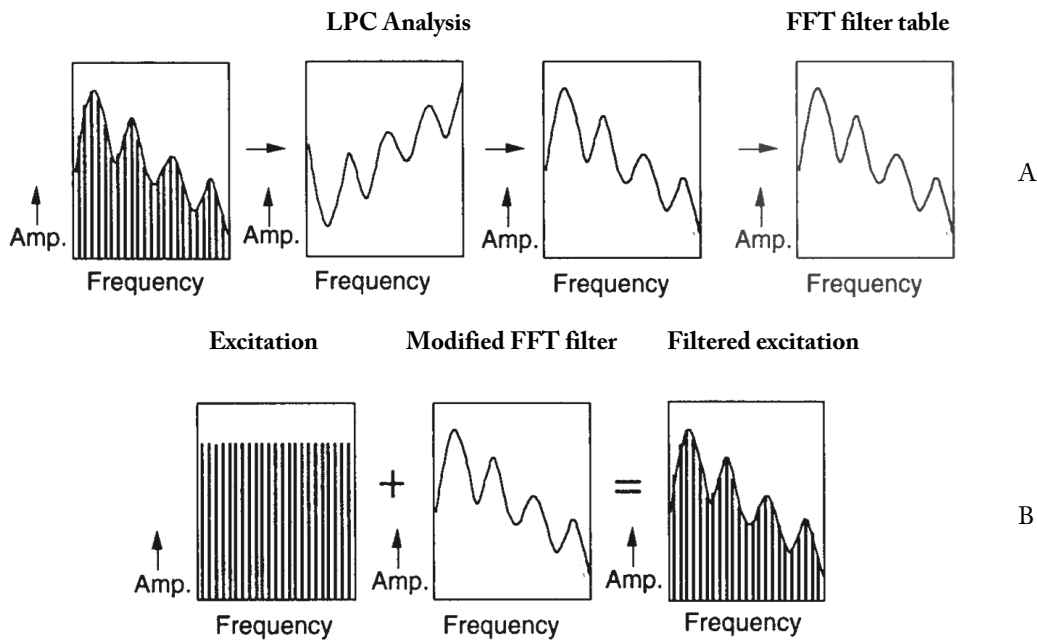


Fig. 5-10. Schema di funzionamento dell’algoritmo di analisi/risintesi implementato: analisi LPC del segnale, determinazione del filtro delle formanti ed esportazione del vettore di coefficienti FFT (a); sintesi tramite filtraggio in frequenza della sorgente di eccitazione (b)¹⁸³.

¹⁸³ Rielaborazione da C. Roads – The computer music tutorial, 1996.

5.3 Il programma e l'ambiente di sviluppo

Fra i possibili ambienti di sviluppo e linguaggi di programmazione utili per la progettazione e realizzazione del programma è stata data preferenza alle piattaforme che si occupano di *audio processing* in modo specifico e garantiscono alte prestazioni in fase di elaborazione dei dati (*real-time*). Tali sistemi mettono a disposizione dello sviluppatore librerie che includono un gran numero di funzioni dedicate alla costruzione di algoritmi di sintesi digitale, all'interfacciamento del programma con dispositivi esterni e all'interpretazione automatica delle informazioni provenienti da detti dispositivi (ad es. messaggi di controllo di tipo MIDI); fra i più indicati si evidenziano: Super Collider¹⁸⁴, Pure Data¹⁸⁵ e Max/MSP¹⁸⁶. Il primo dispone di un ambiente di sviluppo che permette la definizione delle funzioni esclusivamente per mezzo di codice (il linguaggio di programmazione utilizzato è di tipo *object-oriented*, di intuitiva comprensione); al contrario, Pure Data e Max/MSP mettono a disposizione dell'utente-sviluppatore un'interfaccia grafica e un ambiente di sviluppo di utilizzo ancora più semplice. L'approccio (*object-oriented*) adottato in Pure Data e Max/MSP nasce dal presupposto che i processi di sintesi possano essere descritti attraverso diagrammi di flusso, in cui più unità sono connesse tra loro e interagiscono; dette piattaforme sfruttano questa condizione come interfaccia per l'utente, permettendogli di focalizzare l'attenzione non sugli aspetti linguistici della programmazione ma sul grafo che descrive le relazioni tra moduli di generazione¹⁸⁷. Le funzioni necessarie alla costruzione del programma sono dette *patch* e si realizzano tramite interconnessione di "oggetti", rappresentati graficamente e di facile riconoscimento. Le relazioni logiche esistenti fra le funzioni vengono definite tramite *patch cords*, cioè linee che collegano gli ingressi (*inlet*) e le uscite (*outlet*) degli oggetti e delle stesse *patch*. L'interfaccia che caratterizza dette piattaforme non obbliga lo sviluppatore alla definizione delle funzioni esclusivamente per via grafica; il linguaggio di programmazione alla base degli oggetti (C, C++, Java, e JavaScript) è utilizzabile per definire funzioni esterne (*third-party object*) successivamente integrabili nel sistema.

In riferimento alle funzionalità supportate, le tre piattaforme risultano sostanzialmente equivalenti; per la progettazione del *software* di sintesi della zampogna si è deciso, pertanto, di utilizzare l'approccio grafico dell'ambiente messo a disposizione in Max/MSP in quanto questo minimizza la scrittura di codice. La diffusione della piattaforma è tale da garantire la reperibilità di

¹⁸⁴ SuperCollider – Real-time audio synthesis and algorithmic composition (<http://supercollider.sourceforge.net>)

¹⁸⁵ Pure Data – PD community site (<http://puredata.info>)

¹⁸⁶ Cycling '74 Max/MSP (<http://cycling74.com/products/maxmspjitter/>)

¹⁸⁷ V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia, 2008. p. 210-211.

un numero notevole di librerie esterne, le cui funzioni sono realizzate dagli utenti di una *community* di sviluppatori e reperibili gratuitamente sulla rete.

5.3.1 Progettazione e realizzazione del *software*

Il programma di sintesi realizzato nel presente progetto di tesi non è complesso e la sua logica di funzionamento risulta di facile comprensione; questa viene rappresentata dallo schema a blocchi in fig. 5-11, nel quale si identificano le funzioni (*patch*) principali e le relazioni tra loro intercorrenti. In particolare si individuano i sotto elencati sette blocchi logici:

1. Input 1: comprende le funzioni che permettono all'utente di selezionare alcune opzioni di sintesi tramite l'interfaccia grafica del programma (GUI);
2. Input 2: comprende le funzioni che gestiscono la canalizzazione dei messaggi di controllo, provenienti da un controller MIDI esterno, nelle *patch* di sintesi corrispondenti;
- 3-6. Synth 1-4: rappresentano *patch* complesse, che includono le funzioni necessarie a sintetizzare rispettivamente il suono del chanter sinistro (Synth1), di quello destro (Synth2), del bordone maggiore (Synth3) e di quello minore (Synth4);
7. Output: comprende le funzioni dedicate al messaggio (*gain/panning*) dei segnali provenienti dai sintetizzatori e la loro trasmissione alle due uscite (L/R) della scheda audio.

Le opzioni selezionate e i messaggi di controllo provenienti dai blocchi di input pilotano le *patch* di sintesi; poiché il bordone minore non prevede la modulazione di più note ma viene intonato in modo permanente sulla dominante della scala, la sua *patch* di riferimento non riceve messaggi provenienti dall'interfaccia di controllo. I blocchi Synth1-3 sono strutturati internamente allo stesso modo e rappresentano la parte centrale del programma; il funzionamento di queste *patch* viene illustrato nello schema a blocchi in fig. 5-12, che descrive minuziosamente le relazioni esistenti fra le singole funzioni che gestiscono la sintesi. I paragrafi successivi analizzano dettagliatamente l'implementazione di ogni componente del diagramma.

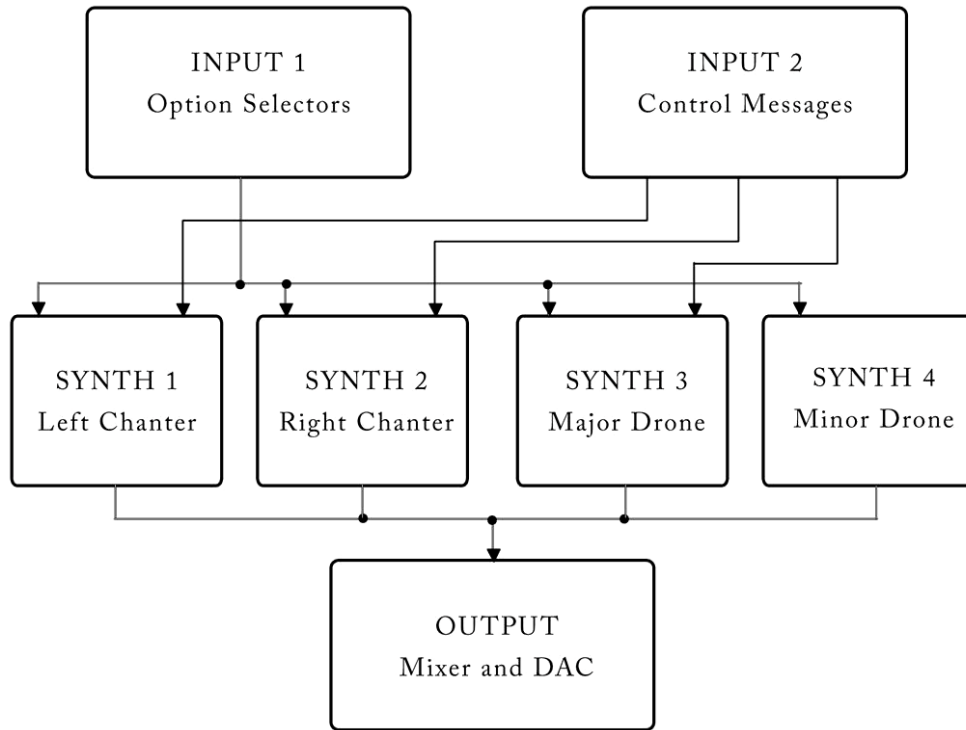


Fig. 5-10. Diagramma di flusso del sintetizzatore (schema generale).

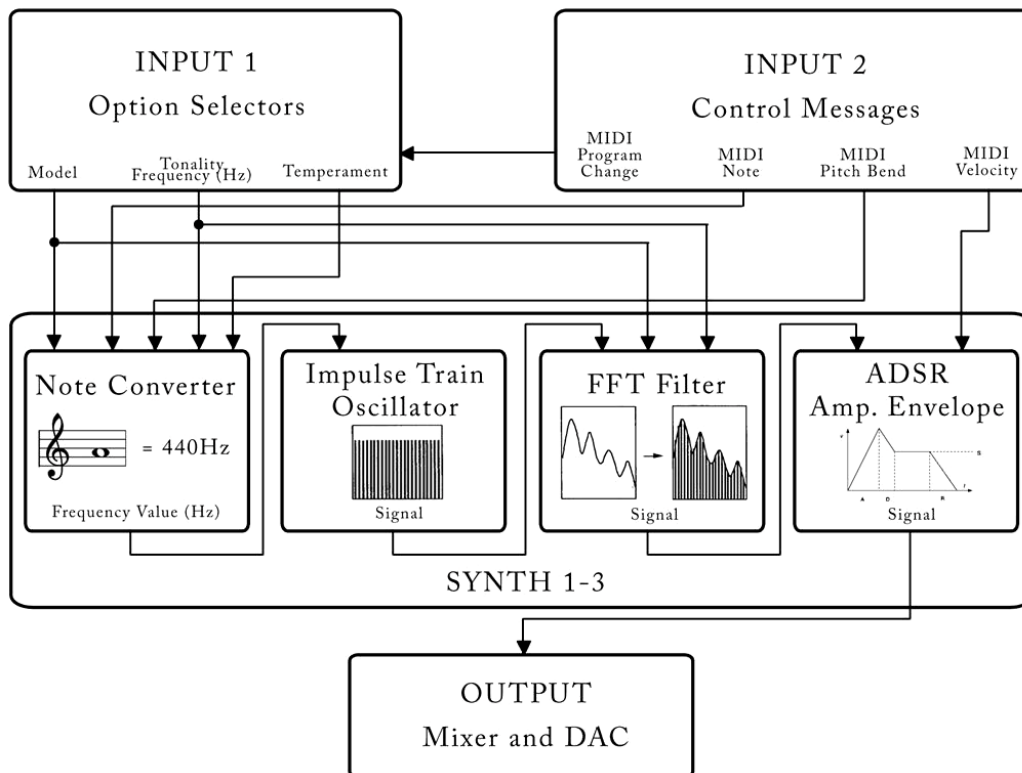


Fig. 5-12. Diagramma di flusso delle patch di sintesi (schema dettagliato)

5.3.2 Selezione dello strumento

La sezione denominata “Input 1” nello schema a blocchi in fig. 5-12 include le funzioni per la gestione delle opzioni di sintesi, selezionabili dall’utente finale tramite un insieme di bottoni, menù a tendina e *number box*. Solo alcuni di questi elementi sono visualizzati nella versione *runtime* del programma e di fatto costituiscono la sua interfaccia grafica (GUI).

Il menu a tendina illustrato in fig. 5-13a gestisce la selezione del modello di zampogna tra le opzioni: zampogna a chiave, surdulina, zampogna zoppa. La selezione può avvenire manualmente, tramite l’input della tastiera del computer, oppure automaticamente, tramite un apposito messaggio MIDI inviato dall’interfaccia di controllo esterna e decodificato da una funzione del blocco “Input 2”. L’eventuale aggiornamento della posizione del selettore provoca la trasmissione di un indice numerico alle *patch* per la sintesi delle varie canne sonore, che provvedono ad aggiornare automaticamente i parametri per la generazione delle note e i coefficienti dei filtri per la modellazione degli spettri.

La tonalità dello strumento viene definita per mezzo degli “oggetti” illustrati in fig. 5-13b, 5-13c, 5-13d. Un menù a tendina permette l’impostazione della tonalità di base dello strumento e un bottone di “raddoppio” estende il *range* delle tonalità all’ottava inferiore; in tal modo il programma mette a disposizione dell’utente una gamma di tonalità notevolmente estesa, che va dal Do#3 al Do5. Un oggetto di tipo *number box* gestisce l’alterazione dell’intonazione di base, espressa in frequenza e riferita alla nota di La4, la cui fondamentale è generalmente indicata in 440 Hz.

Il menù a tendina illustrato in fig. 5-13e funge da selettore del temperamento della scala e risulta particolarmente importante per definire la consonanza fra le note delle varie canne sonore. L’implementazione di questa funzione viene approfondita al par. 5.3.4.

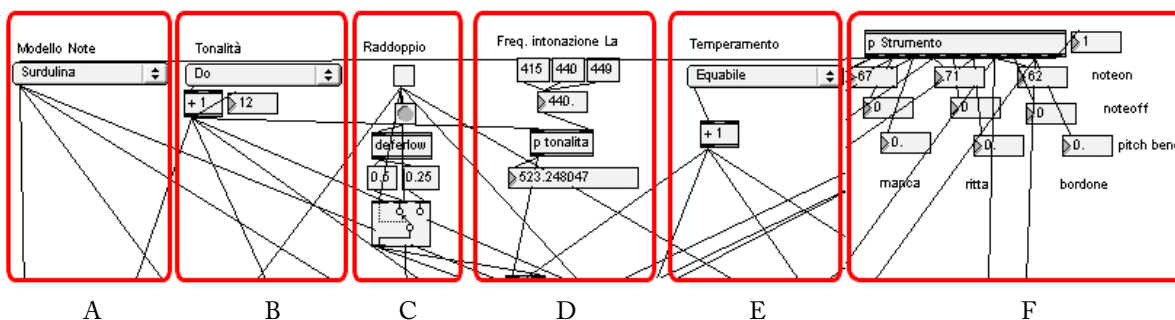


Fig. 5-13. Sezioni della *patch* principale del programma relative ai blocchi logici di input 1 e 2.

5.3.3 Gestione dei messaggi di controllo

La scelta del protocollo di comunicazione gioca un ruolo fondamentale nella costruzione del blocco “Input 2”, poiché l’ambiente di sviluppo di Max/MSP mette a disposizione numerose funzioni che si occupano in modo specifico della decodifica dei messaggi di controllo entranti di tipo MIDI.

Il controller della zampogna elettronica trasmette sul medesimo canale di comunicazione i messaggi riferiti alle note suonate sulle tre canne (chanter sinistro, chanter destro e bordone maggiore). Il collegamento fra controller e computer avviene tramite porte MIDI; risulta pertanto necessario disporre di un’interfaccia *MIDI to USB* oppure di una scheda audio dotata di porta MIDI In. Poiché alcune delle note eseguite sui chanter e sul bordone posseggono lo stesso *pitch*, e quindi sono identificate dalla medesima codifica MIDI, si è deciso di abbinare ad ogni canna sonora un canale MIDI differente (v. par. 4.4.3). A livello *software*, tale informazione viene utilizzata per identificare il destinatario e indirizzare i messaggi verso la *patch* appropriata. La decodifica dal formato binario a quello numerico avviene per mezzo degli oggetti *midiin*, che rappresenta un ricevitore sintonizzato su un particolare canale MIDI e *midiparse*, che opera una discriminazione dei messaggi in base al tipo di comando espresso (v. par. 4.3.3). Nel programma vengono utilizzati anche gli oggetti *notein* e *xbendin*, che filtrano in modo automatico il contenuto dei messaggi e comunicano i valori esclusivamente in relazione ai comandi di *Note On* e *Pitch Bend*.

La *patch* implementata per la gestione dei parametri di controllo, illustrata in fig. 5-13f, è dotata di dieci uscite indipendenti (*outlet*): una di queste è relativa al comando MIDI di *Program Change*, responsabile della selezione automatica del modello di zampogna; le altre formano una matrice 3x3, che distingue sulle righe i tre sintetizzatori e sulle colonne il tipo di comando. I valori di *Note On* e di *Pitch Bend* sono indirizzati alla sezione del Synth che si occupa di definire la frequenza dell’oscillatore; quelli riferiti al comando di *Note Off* sono indirizzati alla sezione che gestisce l’involuppo di ampiezza del segnale sulla base dello studio delle curve ADSR.

La costruzione della *patch* è stata studiata in modo tale da poter rispondere al controllo di una qualunque interfaccia MIDI, come ad esempio una tastiera elettronica, a patto che vengano rispettate alcune specifiche (3 canali MIDI, estensione delle note limitata). I valori MIDI corrispondenti ai canali e ai *pitch* supportati sono riportati nella sezione di appendice della presente tesi.

5.3.4 Note, tonalità e temperamento della scala

In fig. 5-12 viene indicata col nome di “Note Converter” una sezione specifica della *patch* di sintesi che si occupa di trasformare i parametri di controllo provenienti dall’interfaccia (quelli che si riferiscono alle note suonate) in valori numerici che esprimono la frequenza assegnata agli oscillatori, cioè la frequenza fondamentale di ogni onda sonora generata. I valori di dette frequenze dipendono, oltre che dal messaggio MIDI che esprime la nota suonata, dalla tonalità dello strumento da sintetizzare e dall’eventuale correzione di intonazione. Max/MSP mette a disposizione dello sviluppatore funzioni che si occupano della conversione automatica dei valori MIDI in numeri decimali che esprimono le frequenze delle note di riferimento; tuttavia il metodo di conversione adottato da dette funzioni si basa sull’assegnazione di valori numerici che rispondono al criterio della scala musicale temperata.

La scala temperata (o scala a temperamento equabile) è stata introdotta alla fine del diciassettesimo secolo¹⁸⁸ per ovviare al problema della mancata consonanza fra le note della scala naturale cromatica (quella definita dalla divisione dell’ottava in 12 semitoni) nel caso di cambiamento della tonalità del brano musicale o dello strumento¹⁸⁹. Essa si basa sulla suddivisione dell’ottava in dodici parti uguali (ogni semitono si discosta dal precedente e dal successivo di 100 cent.). La sua diffusione è tale da potersi affermare che rappresenti lo standard di intonazione utilizzato per la maggior parte degli strumenti musicali esistenti o, quanto meno, di uso comune.

Come riscontrato anche per altri aerofoni a sacco, la zampogna adotta un criterio di intonazione differente da quello sopra citato in quanto le capacità melodico-armoniche sono limitate esclusivamente alla scala diatonica, fondata sulla frequenza corrispondente alla tonalità dello strumento; pertanto in relazione allo sviluppo del programma di sintesi non risulta possibile la fruizione delle funzioni di conversione messe a disposizione dalla piattaforma e si rende necessario implementare un metodo di definizione delle frequenze “ad hoc”. Per garantire allo stesso tempo la fedeltà dell’intonazione (che deve rispettare i canoni degli strumenti tradizionali) e la flessibilità della sintesi sonora, che permette la scelta arbitraria della tonalità, non risulta conveniente esprimere le frequenze delle note per via numerica ma sulla base di rapporti matematici fra queste esistenti.

I valori che esprimono detti rapporti non sono però univoci. In considerazione che il temperamento utilizzato in fase di accordatura della zampogna non è ben definito, ma variabile da

¹⁸⁸ La definitiva affermazione dell’uso di tali modifiche può farsi risalire alla pubblicazione del *Musikalische Temperatur* di Andreas Werckmeister datato 1691.

¹⁸⁹ L’intonazione basata sulla tecnica classica, cioè quella fondata sulla scala naturale garantisce la consonanza perfetta solo per alcune note e non permette il cambio di tonalità.

caso a caso, l'introduzione di una funzione per la selezione del temperamento desiderato diventa essenziale. L'individuazione dei rapporti viene operata tenendo presenti alcune nozioni sul metodo di intonazione della zampogna.

Nel metodo tradizionale la regolazione dell'intonazione delle note di ogni canna sonora non viene effettuata sulla base di una frequenza di riferimento esterna¹⁹⁰ (ad es. in La4 del diapason) o tramite l'ausilio di accordatori ma "ad orecchio"; in linea di massima, è possibile affermare che il processo di accordatura si basi sulla ricerca della perfetta consonanza¹⁹¹ fra le note in scala. La presenza di una o più canne di bordone a intonazione fissa, modulate sulla dominante (o quinto grado) della scala, rappresenta la ragione principale per cui l'estensione della zampogna viene limitata alla scala musicale diatonica e non può essere rapportata a quella cromatica; pertanto l'intonazione dei chanter viene effettuata riferendosi alla nota emessa dai bordoni, poiché la combinazione fra le note eseguite sui chanter e la nota fissa di bordone formano i due accordi possibili. Nel processo di accordatura, sia nel caso di note identiche (ad es. le note più alte sui chanter di una zampogna a chiave coincidono con quelle emesse dai bordoni), sia in quello di note differenti (ad es. note intervallate di una terza o di una quinta), la ricerca della consonanza consiste nell'individuazione del rapporto fra le note che annulla, o minimizza, il fenomeno dei battimenti.

I rapporti matematici che consentono la massima consonanza fra le note appartenenti a una scala musicale diatonica (cioè priva di alterazioni) sono quelli fondati sulla teoria degli armonici poiché questo criterio garantisce la coincidenza tra le frequenze parziali delle note¹⁹². Nello specifico la scala musicale a cui si fa riferimento (chiamata scala naturale) si costruisce partendo dai rapporti che definiscono gli intervalli principali:

1. 2:1: ottava (il rapporto è basato sul primo armonico della nota di riferimento);
2. 3:2: quinta (secondo armonico);
3. 4:3: quarta (terzo armonico);
4. 5:6: terza maggiore (quarto armonico);

¹⁹⁰ Questa è la principale ragione per cui le zampogne suonano spesso da "solista".

¹⁹¹ Per alcuni modelli di zampogna e in alcune particolari regioni geografiche si riscontra la tendenza a variare l'intonazione di alcune note in modo da creare particolari effetti di dissonanza; l'intonazione di dette note non viene quindi effettuata seguendo il criterio generale.

¹⁹² Scala naturale – Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia
(http://fisicaonemusica.unimore.it/Scala_naturale.html)

5. $6:5$: terza minore (quinto armonico);

e, successivamente, tramite interpolazione degli stessi: l'intervallo di sesta viene ricavato dalla moltiplicazione della terza maggiore per la quarta (il risultato indica un rapporto di $5:3$), quello di settima maggiore dalla terza maggiore per la quinta ($15:8$) e quello di seconda dalla quinta per la quarta ($9:4$) che, riportato all'ottava di riferimento, risulta pari a $9:8$.

Temperamento naturale con semitono diatonico			Temperamento in scala pitagorica			Temperamento equabile		
<i>Nota</i>	<i>Rapporto</i>	<i>Cent</i>	<i>Nota</i>	<i>Rapporto</i>	<i>Cent</i>	<i>Nota</i>	<i>Rapporto</i>	<i>Cent</i>
Do ₄	1:1	0.000	Do ₄	1:1	0.000	Do ₄	1:1	0.000
Do # ₄	16:15	111.731	Do # ₄	2187:2048	113.685	Do # ₄	$\sqrt[12]{2}$	100.000
Re ₄	9:8	203.910	Re ₄	9:8	203.910	Re ₄	$\sqrt[12]{2^2}$	200.000
Mi <i>b</i> ₄	6:5	315.641	Mi <i>b</i> ₄	32:27	294.135	Mi <i>b</i> ₄	$\sqrt[12]{2^3}$	300.000
Mi ₄	5:4	386.314	Mi ₄	81:64	407.820	Mi ₄	$\sqrt[12]{2^4}$	400.000
Fa ₄	4:3	498.045	Fa ₄	4:3	498.045	Fa ₄	$\sqrt[12]{2^5}$	500.000
Fa # ₄	45:32	590.224	Fa # ₄	729:512	611.730	Fa # ₄	$\sqrt[12]{2^6}$	600.000
Sol ₄	3:2	701.955	Sol ₄	3:2	701.955	Sol ₄	$\sqrt[12]{2^7}$	700.000
Sol # ₄	8:5	813.686	Sol # ₄	6561:4096	815.640	Sol # ₄	$\sqrt[12]{2^8}$	800.000
La ₄	5:3	884.359	La ₄	27:16	905.865	La ₄	$\sqrt[12]{2^9}$	900.000
Si <i>b</i> ₄	9:5	1017.596	Si <i>b</i> ₄	16:9	996.090	Si <i>b</i> ₄	$\sqrt[12]{2^{10}}$	1000.000
Si ₄	15:8	1088.269	Si ₄	243:128	1109.775	Si ₄	$\sqrt[12]{2^{11}}$	1100.000
Do ₅	2:1	1200.000	Do ₅	2:1	1200.000	Do ₅	2:1	1200.000
A			B			C		

Tab. 5-14. Scala a temperamento naturale con semitono diatonico (a), diatonica pitagorica (b) e cromatica a temperamento equabile (c).¹⁹³ Tutti i rapporti matematici riportati fanno riferimento alla nota di Do₄.

¹⁹³ Paragoni tra le diverse scale – Dipartimento di Fisica dell'Università di Modena e Reggio Emilia
([http://fisicaonemusica.unimore.it/Paragoni tra le diverse scale.html](http://fisicaonemusica.unimore.it/Paragoni%20tra%20le%20diverse%20scale.html))

Una variante della scala naturale, i cui coefficienti sono ricavati tramite interpolazione dei rapporti principali e secondari, definisce anche i semitoni corrispondenti alle alterazioni della scala diatonica, essenziali per la rappresentazione delle note delle zampogne ottenute tramite diteggiature “a forchetta”. Detta scala (naturale con semitono diatonico), riportata in tab. 5-14a, viene adottata nell’implementazione del presente progetto, come base di partenza per l’individuazione dei rapporti necessari a definire le note della zampogna.

Per verificare la validità degli intervalli definiti nella scala naturale e comprendere in che misura essi rappresentino quelli delle zampogne, è stata condotta la seguente indagine. Considerando che la maggioranza dei suonatori “tradizionali” di zampogna è del tutto inconsapevole dei principi fisici, matematici e musicali alla base dell’intonazione degli strumenti adoperati e, come in precedenza riferito, accorda “a orecchio” gli stessi, si è pensato di estrapolare le informazioni necessarie basandosi sulle risposte date ad alcune domande loro avanzate. Tale indagine diretta è stata preferita allo studio delle registrazioni di brani musicali tradizionali poiché questi ultimi, troppo spesso, riportano strumenti non perfettamente intonati. Ad alcuni suonatori¹⁹⁴ è stato chiesto di descrivere minuziosamente il procedimento di accordatura, con particolare riferimento alle note di confronto, cioè quelle che vengono utilizzate come riferimento per la consonanza. Dall’indagine sono emersi i seguenti dati:

1. la totalità dei suonatori intraprende il processo di accordatura partendo dall’intonazione della dominante, cioè la nota del bordone, e non dalla tonica; dopodiché provvede alla regolazione delle medesime note presenti sui chanter (tramite il criterio dell’unisono).
2. La nota di tonica, che rappresenta anche la tonalità dello strumento, viene intonata per consonanza con la dominante, eseguita contemporaneamente dai bordoni; pertanto il rapporto matematico che definisce l’intervallo tonica-dominante è 3:2, cioè quello di “quinta giusta”.
3. Il secondo grado della scala viene intonato per consonanza con la dominante. L’intervallo fra queste due note è di “quarta giusta” (4:3); pertanto il rapporto che esprime il secondo grado in funzione della tonica risulta pari a 9:8.

¹⁹⁴ Fra i suonatori a cui sono state posti detti quesiti, si menzionano Marco Cignitti, Francesco Durandi, Giuseppe Salamone, Gigi Rizzo.

4. La terza maggiore viene intonata riferendosi alla dominante o alla tonica; in entrambi i casi il valore dell'intervallo, rispetto alla tonalità di base, risulta pari a 5:4. Dall'analisi di alcune esecuzioni tradizionali è stata riscontrata una tendenza a decrementare la frequenza di intonazione della terza, creando un particolare effetto di dissonanza. Risultando tale circostanza piuttosto marginale e non è ben definita (la causa può risiedere nella mancata intonazione dello strumento piuttosto che in una precisa volontà dell'esecutore) non viene presa in considerazione a livello di implementazione del *software*.
5. L'intonazione del quarto grado della scala è quella più soggetta a variazioni. Detta nota può essere intonata in modo da risultare consonante con la tonica, con la dominante oppure con il secondo grado. A seconda del riferimento utilizzato per l'intonazione, il rapporto che definisce l'intervallo varia e, in particolare, nel primo caso (consonanza fra tonica e quarta) corrisponde a 4:3 e negli ultimi due a 27:20. Il criterio tradizionale di accordatura tende a preferire la consonanza seconda-quarta-quinta¹⁹⁵, considerata più importante; ciononostante alcuni suonatori intonano il quarto grado basandosi sulla consonanza con la tonica¹⁹⁶.
6. La sesta maggiore, presente nella zampogna zoppa e in alcuni modelli di surdulina e non in quella a chiave tradizionale, viene accordata normalmente tramite consonanza con il secondo grado o con la dominante della scala; in tal caso il suo intervallo viene definito dal rapporto numerico 27:16 (costruito come secondo grado della quinta giusta).
7. La sensibile della scala, corrispondente al settimo grado maggiore, viene intonata indifferentemente con la dominante, col secondo grado o con la tonica poiché i rapporti corrispondenti risultano tutti pari a 15:8. Va segnalata l'esistenza di una tendenza, riscontrata in alcune regioni del meridione d'Italia e per la sola zampogna a chiave, all'intonazione del settimo grado della scala nella sua variante minore.

Lo studio condotto evidenzia che la scala a temperamento naturale con semitono diatonico risulta essere sostanzialmente valida per la rappresentazione delle note della zampogna, con le uniche eccezioni dei rapporti che esprimono gli intervalli di quarta giusta e sesta maggiore. In considerazione che detti rapporti sono variabili a seconda delle regioni, degli strumenti utilizzati o

¹⁹⁵ Come sostenuto da Marco Cignitti.

¹⁹⁶ Come sostenuto da Francesco Durandi e Gigi Rizzo.

dei gusti personali dell'esecutore, nel *software* di sintesi sono stati implementati due schemi di temperamento basati sulla scala naturale:

1. la prima opzione disponibile nel selettore del temperamento dello strumento implementa la scala naturale con semitono diatonico “modificata” nel rapporto che definisce l'intervallo di quarta. Detto rapporto viene espresso come terza minore del secondo grado e risulta pari a 27:20. L'intervallo di sesta maggiore viene mantenuto inalterato.
2. La seconda opzione attiva uno schema sostanzialmente identico al precedente, differenziandosi per l'intervallo di quarta che viene ulteriormente modificato. Il rapporto matematico 11:8 definisce una particolare quarta dissonante, lievemente crescente ma il cui rapporto non coincide con quello della quarta aumentata, già prevista nella scala. Detto rapporto rappresenta efficacemente l'alterazione più utilizzata nell'intonazione delle zampogne del sud Italia¹⁹⁷. Inoltre, nel presente schema la sesta maggiore viene alterata seguendo il criterio dell'intonazione tradizionale.

Come riferito in precedenza, il progetto sviluppato in questa tesi implementa, oltre alle tipologie classiche di zampogna, un modello di strumento innovativo basato sulle modifiche introdotte da Ricci e Miniscalco (v. par. 1.2.4). La presenza in questo modello di una canna di bordone a intonazione variabile conferisce allo stesso la possibilità di eseguire un numero di accordi tale da estendere la scala musicale ben oltre il limite di quella diatonica. La tendenza cromatica dello strumento, che può cambiare tonalità a differenza dei modelli tradizionali, impone l'implementazione di una scala musicale con temperamento differente. La terza opzione prevista nel selettore del temperamento attiva uno schema di intonazione che rispetta fedelmente la scala a temperamento equabile (i cui rapporti sono riportati in tab. 5-14*b*), la più indicata per garantire la consonanza fra le note di una scala variabile. Il principale svantaggio di questo schema risiede, paradossalmente, nella mancata consonanza riscontrata in tutti gli intervalli: l'introduzione di un fattore di correzione rende, infatti, tutti gli intervalli “imperfetti” rispetto a quelli della scala naturale ma indipendenti dalla tonalità di riferimento. Pertanto viene assicurata la possibilità di cambiare tonalità senza introdurre “stonature” troppo evidenti, come invece accade con la scala naturale. Gli intervalli che più risentono di questo condizionamento risultano quelli di terza (minore e maggiore),

¹⁹⁷ La tendenza all'alterazione della quarta viene riscontrata nella zampogna a paro calabrese e siciliana, nella surdulina e nella zampogna a chiave lucana.

di sesta (minore e maggiore) e di settima (minore e maggiore), che introducono il fenomeno dei battimenti.

Una quarta opzione introdotta nel programma consente di selezionare il temperamento pitagorico; utilizzato per l'intonazione di alcune cornamuse. Come riscontrato nel caso del temperamento equabile alcuni intervalli possono risultare dissonanti; tuttavia detta scala rappresenta una variante interessante per la sperimentazione di nuove tecniche di accordatura della zampogna.

A livello *software*, detto criterio di intonazione viene implementato tramite una *patch* (illustrata in fig. 5-15) che ammette in ingresso:

1. un valore numerico intero (indice), necessario per richiamare uno dei *preset* memorizzati;
2. un valore decimale, corrispondente alla frequenza che definisce la tonalità di base.

A ogni *preset* corrisponde il rapporto di un particolare intervallo della scala; quando il programma rileva la variazione dell'indice o della frequenza di base, quest'ultima viene moltiplicata per il valore dell'intervallo corrispondente (definito dal *preset*), comunicando in uscita la frequenza della nota suonata. Il metodo sopra descritto viene sfruttato non solo per il calcolo delle frequenze degli oscillatori che generano il suono ma anche per la definizione della tonalità. La sezione del programma che si occupa dell'intonazione di base dello strumento genera in uscita un valore corrispondente al La4; le frequenze che esprimono la tonalità dello strumento vengono calcolate di conseguenza (lo schema utilizzato è quello definito dal temperamento equabile). Tale valore rappresenta l'unico caso di definizione numerica della frequenza, in tutto il progetto.

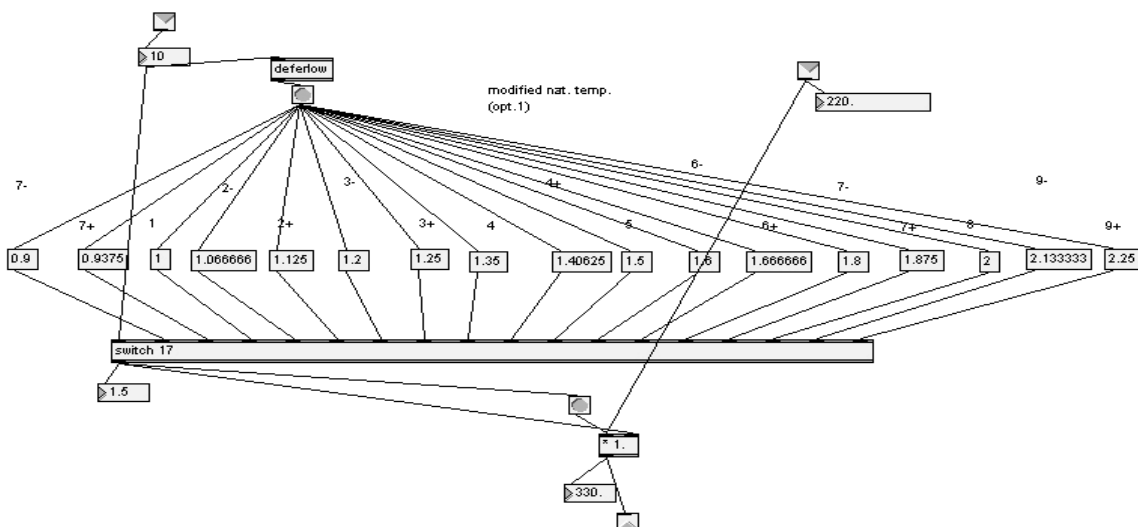


Fig. 5-15. Esempio di *patch* per la definizione della frequenza delle note suonate.

5.3.5 *Pitch bend*

La funzione che nel programma si occupa di modificare la frequenza di oscillazione del generatore di segnale, in modo tale da riprodurre l'effetto del vibrato, è illustrata in fig. 5-16. Detta funzione riceve in ingresso il parametro di *pitch bend*, proveniente dall'interfaccia, già decodificato sulla base del protocollo MIDI tramite una funzione nativa di Max/MSP. I valori del parametro sono compresi nel *range* 0-16383 e vengono scalati secondo un criterio che assegna al valore 8192 (corrispondente all'assenza di alterazione) il coefficiente 1. e al valore 0 (corrispondente alla massima alterazione) il coefficiente 0.8909. Tali coefficienti vengono utilizzati come moltiplicatori della frequenza della nota suonata e sono stati definiti in modo tale da ottenere alterazioni comprese fra -1 tono e +1 tono della scala. Quando il *software* riceve il messaggio MIDI relativo al vibrato della nota in esecuzione aggiorna la frequenza dell'oscillatore corrispondente; il valore di vibrato utilizzato nel progetto corrisponde a 6784 che, scalato, genera un coefficiente pari a 0.981. Poiché il criterio adottato è basato esclusivamente sui rapporti fra le note e non esprime direttamente le frequenze, il risultato è quello di un'alterazione fissa di -32 cent. di tono e indipendente dall'altezza della nota eseguita. Tali parametri garantiscono l'ottenimento di un realistico effetto di vibrato.

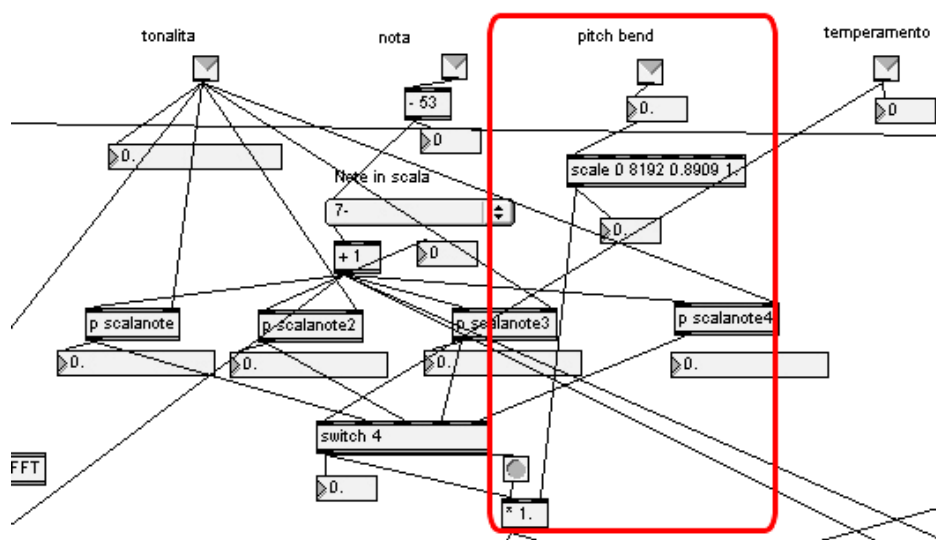


Fig. 5-16. Insieme delle funzioni della *patch* per l'alterazione della frequenza della nota suonata, necessaria per l'ottenimento dell'effetto di vibrato.

Sia nel caso di rappresentazione del vibrato, sia per il semplice aggiornamento delle note eseguite, il *software* garantisce una variazione graduata della frequenza degli oscillatori, evitando salti netti, inesistenti nella "realtà fisica" degli aerofoni. Per ottenere un effetto realistico viene

implementata in Max/MSP una funzione di tipo *line* che modifica (incrementa o decrementa) il valore della frequenza in modo graduato, in un arco di tempo definito. Il valore temporale viene calcolato in base alla media dei dati raccolti (il metodo di misurazione è analogo a quello utilizzato per l'analisi delle curve ADSR, affrontata nei paragrafi 5.1.2. e 5.3.7) e vale 18 msec.

Per simulare l'effetto di "animazione" iniziale delle canne sonore, già illustrato nel cap. 2 della presente tesi, viene implementata una funzione di *pitch bend* automatica, che agisce esclusivamente in fase iniziale del brano (nei primi 300-500 msec, in sincronia con i tempi di attacco delle curve ADSR) e modifica dinamicamente la frequenza dell'oscillatore¹⁹⁸, generando la tipica "stonatura" iniziale dello strumento.

5.3.6 Generazione del segnale e filtraggio

Le sezioni indicate coi nomi di "Impulse Train Oscillator" e "FFT Filter" nel diagramma di flusso in fig. 5-12 si frappongono tra il blocco di "Note Converter" e quello di "Amplitude Envelope" e rappresentano, congiuntamente, la parte più importante di ogni *patch* di sintesi poiché sono dedicate alla generazione effettiva del segnale audio che rappresenta la nota suonata. In considerazione del fatto che l'approccio di sintesi adottato è di tipo sottrattivo i due blocchi implementano rispettivamente un oscillatore digitale, responsabile del meccanismo di eccitazione del sistema e un filtro complesso, che provvede alla sua trasformazione, affinché il suono assuma il timbro caratteristico dello strumento.

Ogni *patch* di sintesi include una funzione per la generazione del segnale di eccitazione, che nel presente progetto corrisponde al treno di impulsi (IT). Il segnale generato dall'oscillatore digitale deve necessariamente possedere una distribuzione uniforme delle componenti dello spettro (il cui involuppo deve risultare piatto) ed essere a banda limitata, in modo da evitare la formazione di artefatti dovuti al fenomeno dell'*aliasing*. Poiché le librerie di Max/MSP non contengono un oggetto specifico per la generazione di un IT a banda limitata occorre utilizzare funzioni sviluppate esternamente oppure ricavare il segnale tramite altre tecniche. È stato possibile importare nella *patch* un oggetto esterno (*vb.blit*¹⁹⁹), disponibile in rete, che ammette in ingresso il valore della frequenza di oscillazione e genera in uscita un segnale IT a banda limitata; tuttavia tale funzione risulta compatibile esclusivamente con le versioni di Max/MSP 4.6-5x per sistema operativo OSX (Apple

¹⁹⁸ La frequenza dell'oscillatore viene dapprima decrementata di un coefficiente compreso tra -3% e -5% (circa un semitono), definito per ogni tipologia di canna sonora. La frequenza viene poi incrementata in modo graduale fino al suo assestamento al valore iniziale (cioè quello reale della nota suonata).

¹⁹⁹ Il suo sviluppatore è Volker Böhm e la pagina web per il *download* dell'oggetto è accessibile all'indirizzo: <http://www.esbasel.ch/Downloads/MaxMSP-Objects.htm>

Macintosh) e non si riesce a reperire un oggetto equivalente compilato per Windows. Per ovviare a ciò il IT può essere ottenuto tramite l'utilizzo di un oggetto *saw~*, che genera un segnale a “dente di sega” limitato in banda, il cui spettro di frequenza contiene tutte le componenti armoniche come nel caso del IT. L'involuppo dello spettro differisce da quello del treno di impulsi poiché non è piatto, ma presenta un andamento decrescente, con le armoniche attenuate rispetto alla fondamentale. La modellazione dell'involuppo è stata realizzata tramite un filtro “notch”, opportunamente tarato e variabile in base alla frequenza di oscillazione, che approssima lo spettro del segnale alla forma desiderata.

Il filtraggio del segnale uscente dall'oscillatore digitale viene effettuato nel dominio della frequenza per mezzo dell'oggetto *pf~* di Max/MSP. Tale funzione implementa un processo automatico di Short-Time Fourier Transform (STFT) del segnale in ingresso, che viene dapprima convertito nel dominio della frequenza, poi trasformato e successivamente riconvertito nel dominio del tempo, in modo da poter essere trasmesso all'uscita della *patch* di sintesi. Ogni istanza dell'oggetto *pf~* necessita della definizione di alcuni parametri relativi a:

1. risoluzione dello spettro (dipendente dal numero di campioni del segnale finestrato e strettamente correlata alla qualità della conversione effettuata);
2. funzione utilizzata per il finestramento del segnale;
3. fattore di sovrapposizione della finestra (*overlap*).

Per comprendere il funzionamento del filtro realizzato, i parametri impostati e il processo di trasformazione che garantisce l'ottenimento dei timbri caratteristici, occorre analizzare nel dettaglio il procedimento di conversione/riconversione del segnale.

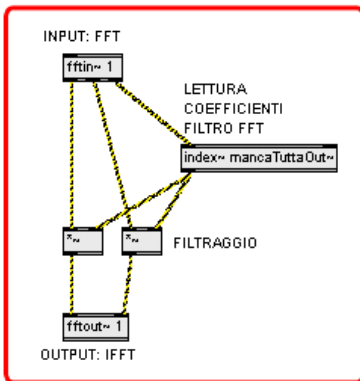
Affinché possa essere trasformato nel dominio della frequenza, il segnale entrante viene sezionato in porzioni (*frame*) attraverso la memorizzazione dei campioni in un *buffer*. La grandezza del buffer è direttamente proporzionale alla qualità della conversione effettuata e, quindi, del suono generato; un valore troppo alto aumenta però la complessità della conversione e può introdurre latenze, incidendo negativamente sulle prestazioni del sistema. Gli algoritmi che si occupano della trasformazione del segnale dal dominio del tempo a quello della frequenza e viceversa sono quelli di *Fast Fourier Transform* (FFT) e *Inverse Fast Fourier Transform* (iFFT); la loro implementazione avviene all'interno dell'oggetto *pf~* (editabile come *subpatch*), come illustrato in fig. 5-17a. Le

prime due uscite dell'oggetto *fftin* isolano le componenti reale e immaginaria dello spettro del segnale all'ingresso del filtro; ai due ingressi dell'oggetto *fftout* corrispondono le medesime componenti dello spettro del segnale in uscita dal filtro. Il meccanismo di filtraggio implementato nel progetto avviene frapponendo tra i due oggetti *fftin* e *fftout* un processo di modifica dei coefficienti dello spettro, effettuato tramite la moltiplicazione di questi per i valori di alcuni coefficienti contenuti all'interno di una tabella ("*mancaTuttaOut*", nell'esempio illustrato in fig. 5-17a), che rappresenta il filtro FFT per l'involuppo dello spettro. La terza uscita dell'oggetto *fftin* viene utilizzata per sincronizzare il procedimento. Il processo di filtraggio non necessita dell'implementazione di funzioni per la conversione dello spettro dalle coordinate cartesiane a quelle polari (che identificano i valori di modulo e fase delle componenti dello spettro) poiché le informazioni relative alla fase non vengono considerate necessarie ai fini della sintesi del suono²⁰⁰ e la tabella dei coefficienti del filtro si riferisce ai valori del solo modulo.

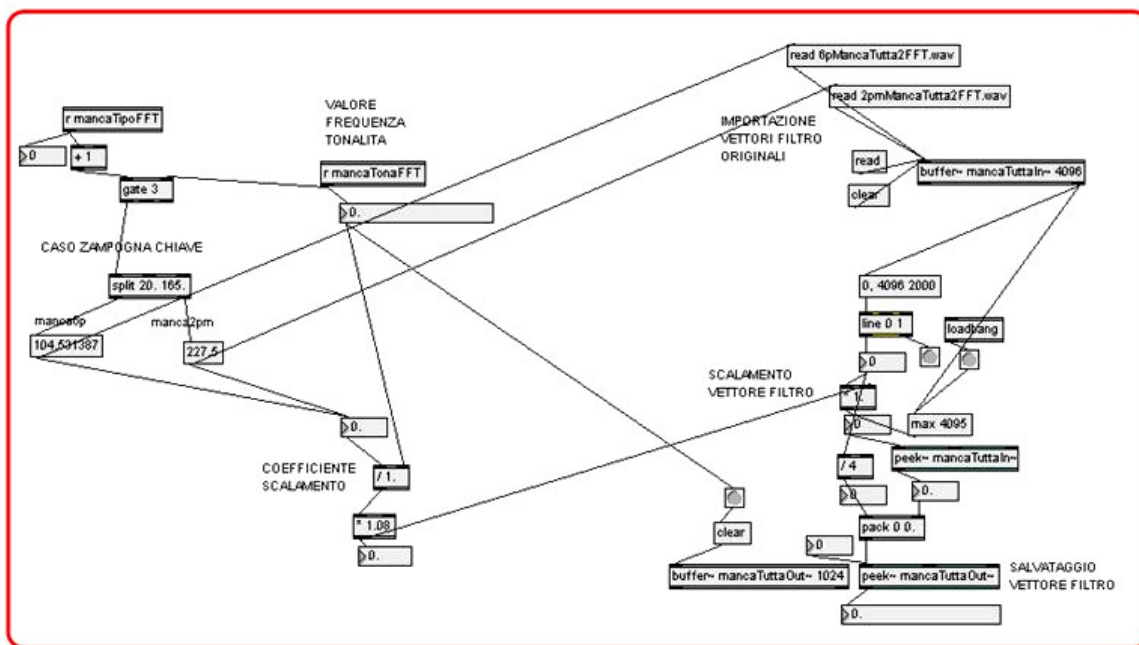
L'algoritmo FFT divide le componenti dello spettro in bande (o bin), il cui numero è pari alla grandezza della finestra (*FFT size* o *window size*); tali bande rappresentano tutte le componenti dello spettro dalla frequenza 0 Hz (DC) a quella di campionamento del sistema. Poiché le informazioni relative alle frequenze superiori a quella di Nyquist (pari a metà del tasso di campionamento) costituiscono una copia speculare delle informazioni precedenti, l'oggetto *pfft~* opera di *default* un processo di eliminazione della ridondanza (per ragioni di efficienza computazionale) e ricostruisce in modo automatico i dati mancanti prima dell'esecuzione della trasformata inversa (iFFT).²⁰¹ Pertanto, la tabella che definisce i coefficienti per il filtraggio dovrà necessariamente essere costituita da un numero di campioni corrispondente alla metà della *FFT size* e rappresentare le componenti in frequenza fino a quella di Nyquist, ignorando quelle successive. Il parametro di *FFT size* assegnato all'oggetto *pfft~* nella *patch* di sintesi è di 2048 punti (o campioni); di conseguenza, la tabella con i coefficienti del filtro deve essere definita su 1024 punti. I parametri scelti rappresentano il compromesso ideale fra la complessità del filtro, in termini di efficienza computazionale, e la qualità del suono ottenuta.

²⁰⁰ Come illustrato in Serra (1997), la tecnica SMS conserva i parametri relativi alla fase delle componenti dello spettro esclusivamente per l'analisi del segnale residuo (la componente stocastica del suono) e non li utilizza in fase di risintesi.

²⁰¹ R. Dudas, C. Lippe - The Phase Vocoder (<http://cycling74.com/2006/11/02/the-phase-vocoder-%E2%80%93-part-i/>)



A



B

Fig. 5-17. Costruzione interna (*subpatch*) dell'oggetto *pfft~*. La sezione A è relativa al filtraggio mentre la sezione B illustra il processo di generazione dinamica del filtro.

Il secondo parametro da assegnare all'oggetto *pfft~* è il tipo di finestra da utilizzare in fase di conversione/riconversione del segnale. Come riferito in precedenza, la moltiplicazione dei campioni di ogni *frame* per una funzione che attenua i valori in prossimità degli estremi della finestra è necessaria per ridurre gli artefatti generati dal processo di trasformazione in frequenza; così come asserito da Roads²⁰², le funzioni di finestramento più indicate per gli scopi di analisi/risintesi sono quelle che presentano un involuppo di tipo “campana” (*bell-shaped*), poiché riducono la distorsione introdotta dal processo di finestramento. La finestra adottata nel progetto è quella di Hanning (anche quelle di Blackman e Hamming risultano funzionali); la sua definizione può essere tralasciata poiché risulta essere impostata di *default* nell'oggetto *pfft~*.

²⁰² C. Roads – The computer music tutorial, 1996. p. 568

Il terzo parametro richiesto è relativo al fattore di sovrapposizione (*overlap*) delle porzioni di segnale finestrate e identifica il valore di *hop size* della STFT, come illustrato in fig. 5-18. L'utilizzo di un fattore di *overlap* maggiore o uguale a 2 è equivalente a un processo di sovracampionamento dello spettro, necessario per proteggere il sistema dagli artefatti introdotti a causa del fenomeno dell'*aliasing*, dovuto al processo di trasformazione del segnale.²⁰³ In riferimento al filtro sviluppato, si è scelto di assegnare all'oggetto *pfft~* un fattore di *overlap* pari a 4, che riduce sufficientemente gli artefatti senza incidere sulle prestazioni del sistema.

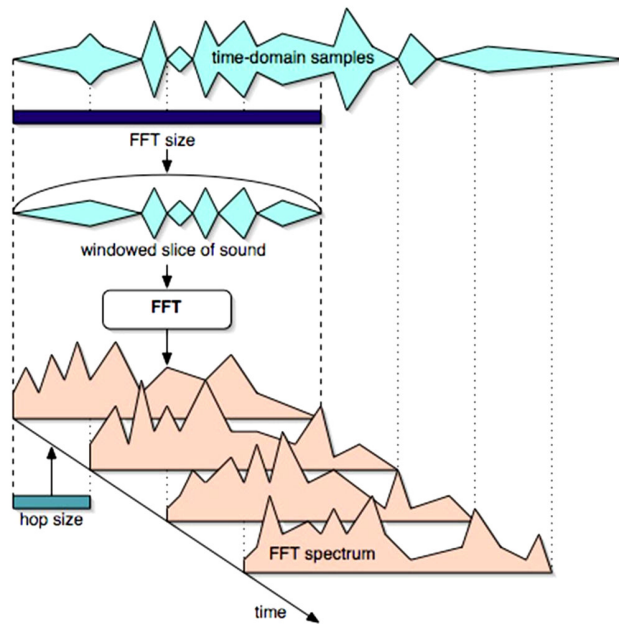


Fig. 5-18. Schema di funzionamento dell'algoritmo di Short Time Fourier Transform (STFT)²⁰⁴

Come sopra riportato, il processo di trasformazione del segnale è dovuto all'interposizione fra il blocco di input e quello di output, di un vettore costituito da 1024 coefficienti, ognuno dei quali rappresenta il fattore di moltiplicazione di ogni banda del filtro. Tale vettore viene generato dinamicamente all'interno dell'oggetto *pfft~* (a livello *subpatch*) per mezzo di un insieme di funzioni appositamente costruite (v. fig. 5-17b). La *patch* riceve in ingresso il valore della frequenza che definisce la tonalità dello strumento; quando tale valore viene aggiornato il programma carica un file esterno contenente la lista dei coefficienti del filtro per l'involuppo dello spettro. L'insieme dei coefficienti non costituisce direttamente il vettore utilizzato per il filtraggio ma rappresenta la base di partenza per la sua costruzione. Poiché non si ha a disposizione un numero di vettori pari a tutte

²⁰³ C. Roads – The computer music tutorial, 1996. p. 555

²⁰⁴ R. Dudas, C. Lippe - The Phase Vocoder (<http://cycling74.com/2006/11/02/the-phase-vocoder-%E2%80%93-part-i/>)

le tonalità possibili²⁰⁵, i parametri caricati dal file esterno (salvato in “*mancaTuttaIn*”, come nell’esempio in fig. 5-17b) vengono trasformati per mezzo di un processo di ricampionamento, che opera una trasposizione in frequenza dei coefficienti adattandoli alla tonalità di riferimento e memorizzandoli in un *buffer* (“*mancaTuttaOut*”), che rappresenta il filtro finale; in questo modo viene garantita la conservazione del timbro caratteristico della canna sonora, che risulta scalabile.

A seconda del modello di zampogna selezionato e del tipo di canna (chanter sinistro, chanter destro, bordone maggiore, bordone minore) si ha a disposizione un certo numero di vettori, che rappresentano i filtri “originali”, ricavati dall’analisi pregressa delle registrazioni. Sulla base della frequenza di riferimento, il *software* seleziona il file relativo alla canna sonora dalla tonalità più vicina. I file sono di tipo “.wav” e contengono un numero di coefficienti superiore a quello necessario (4096 campioni espressi su 32 bit *floating point*); in tal modo si garantisce che il processo di trasposizione basato sul ricampionamento del vettore non introduca evidenti perdite di definizione. L’utilizzo di un filtro unico per la rappresentazione dei timbri di tutte le note della stessa canna sonora (v. par. 5.2 della presente tesi) semplifica notevolmente il processo di filtraggio; i coefficienti del filtro vengono definiti una sola volta (quando viene impostato il modello e la tonalità dello strumento) e non subiscono modifiche durante l’esecuzione, neanche in caso di cambiamento della nota suonata.

5.3.7 Inviluppo di ampiezza e curve ADSR

In tab. 5-19 vengono riportati i dati relativi alla misurazione dei tempi di attacco, decadimento e rilascio del suono di varie canne di zampogna; i parametri implementati nel *software* di sintesi sono riferiti alla media dei valori misurati. In particolare, quelli di attacco e rilascio trovano corrispondenza nello studio di Tzevelekos-Kouroupetroglou²⁰⁶, che analizza la *zournas*, antico oboe popolare greco ad ancia doppia, dalle caratteristiche similari ai chanter della zampogna.

Come riferito in precedenza, le curve ADSR agiscono esclusivamente all’attivazione o alla cessazione del suono delle canne sonore; quindi l’effetto dell’inviluppo d’ampiezza risulta apprezzabile nella fase iniziale del brano e in quella finale, oppure nel caso di esecuzione di note staccate (ad es. nel chanter sinistro di surdulina). Poiché l’effetto di “animazione” delle canne della zampogna è tipicamente asincrono (alcune canne sonore, per via della conformazione differente delle ance, emettono il suono prima di altre) i parametri temporali implementati nel programma

²⁰⁵ L’approccio adottato dal sintetizzatore permette di generare un gran numero di varianti della tonalità dello strumento.

²⁰⁶ P. Tzevelekos, G. Kouroupetroglou - Acoustical analysis of woodwind musical instruments for virtual instrument implementation by physical modeling, 2004.

sono stati modificati in modo da simulare tale effetto. Si è scelto di ritardare i tempi di attacco e decadimento di un coefficiente variabile (0-200 msec), dipendente dal tipo di canna sonora. Nello specifico, non è stato assegnato alcun ritardo al bordone maggiore che, quindi, è la prima canna sonora ad attivarsi; a quello minore e ai chanter sinistro e destro sono stati invece assegnati ritardi rispettivamente di 200, 150 e 80 msec.

ADSR Surdulina	“14 cm”	“16 cm”	“27 cm”
Attacco (chanter sx.)	0.071 sec	0.101 sec	0.063 sec
Decadimento (chanter sx.)	0.022 sec ($N = -1.0\text{dB}$)	0.054 sec ($N = -1.3\text{dB}$)	0.038 sec ($N = -1.0\text{dB}$)
Rilascio (chanter sx.)	0.025 sec	0.040 sec	0.026 sec
Attacco (chanter dx.)	0.105 sec	0.082 sec	0.079 sec
Decadimento (chanter dx.)	0.022 sec ($N = -1.3\text{dB}$)	0.025 sec ($N = -1.2\text{dB}$)	0.050 sec ($N = -2.0\text{dB}$)
Rilascio (chanter dx.)	0.028 sec	0.036 sec	0.038 sec
Attacco (bordoni)	0.097 sec	0.114 sec	0.095 sec
Decadimento (bordoni)	0.017 sec ($N = -2.0\text{dB}$)	0.078 sec ($N = -1.0\text{dB}$)	0.064 ($N = -1.0\text{dB}$)
Rilascio (bordoni)	0.038 sec	0.042 sec	<i>n.a.</i>
Attacco (media)	0.089 sec		
Decadimento (media)	0.041 sec ($N = -1.3\text{dB}$)		
Rilascio (media)	0.034 sec		
Attacco (zeppa)	0.021 sec		
Decadimento (zeppa)	0.029 sec ($N = -2.0\text{ dB}$)		
Rilascio (zeppa)	0.019 sec		

Tab. 5-19b. Tempi di attacco, decadimento e rilascio nella surdulina. Le escursioni del livello di energia del segnale nelle fasi di attacco e rilascio sono pari a $-\text{inf}-0\text{dB}$ e viceversa; in tali fasi la curva ADSR assume andamento logaritmico. Ai tempi di decadimento, invece, corrispondono escursioni lineari variabili ($0-N\text{dB}$) con N definito come da tabella. Gli ultimi tre dati si riferiscono alle curve ADSR specifiche per il chanter sinistro, in caso di esecuzione di note staccate, tramite zeppa.

ADSR Zampogna a chiave	2 ½ palmi	6 palmi
Attacco (chanter sx.)	0.049 sec	0.050 sec
Decadimento (chanter sx.)	0.100 sec ($N = -1.75\text{dB}$)	0.110 sec ($N = -1.3\text{dB}$)
Rilascio (chanter sx.)	0.042 sec	0.049 sec
Attacco (chanter dx.)	0.045 sec	0.055 sec
Decadimento (chanter dx.)	0.073 sec ($N = -2.25\text{dB}$)	0.050 sec ($N = -1.0\text{dB}$)
Rilascio (chanter dx.)	0.017 sec	0.060 sec
Attacco (bordoni)	<i>n.a.</i>	0.025 sec
Decadimento (bordoni)	<i>n.a.</i>	<i>n.a.</i>
Rilascio (bordoni)	0.044 sec	0.099 sec
Attacco (media)	0.045 sec	
Decadimento (media)	0.083 sec ($N = -1.6\text{dB}$)	
Rilascio (media)	0.052 sec	

Tab. 5-19a. Tempi di attacco, decadimento e rilascio nella zampogna a chiave. Le escursioni del livello di energia del segnale nelle fasi di attacco e rilascio sono pari a $-\text{inf}-0\text{dB}$ e viceversa; in tali fasi la curva ADSR assume andamento logaritmico. Ai tempi di decadimento, invece, corrispondono escursioni lineari variabili ($0-N\text{dB}$) con N definito come da tabella.

In Max/MSP l'implementazione delle curve ADSR avviene tramite gli oggetti *function* e *line*, come illustrato in fig. 5-20. L'oggetto *function* mette a disposizione un editor grafico nel quale poter memorizzare le coordinate dei punti che formano la curva ADSR (la coordinata X è relativa al valore temporale in msec., mentre quella Y è relativa al coefficiente di amplificazione). La seconda uscita (*outlet*) dell'oggetto deve essere accoppiata a una funzione di *line*, che permette di ottenere l'interpolazione automatica del valore di amplificazione. Moltiplicando tale coefficiente per il segnale in uscita dall'oscillatore digitale si ottiene l'involuppo dell'ampiezza. La lettura sequenziale dei valori viene avviata ogni qualvolta l'oggetto *function* rilevi un *bang* al suo ingresso (*inlet*). Il messaggio di *sustain* permette di definire il "breakpoint" del grafico, cioè i punti in cui la lettura deve essere bloccata (temporaneamente). Il breakpoint in fig. 5-20 (riconoscibile dal contorno bianco) rappresenta la fase di sostegno della curva ADSR, nella quale il fattore di amplificazione rimane costante. Al riavvio della lettura (tramite la pressione del bottone *next*), vengono comunicati, in uscita, i parametri della fase di rilascio. Nel programma di sintesi realizzato l'invocazione del comando *next* viene sincronizzata con la ricezione dei messaggi MIDI di *NoteOn* e *NoteOff*.

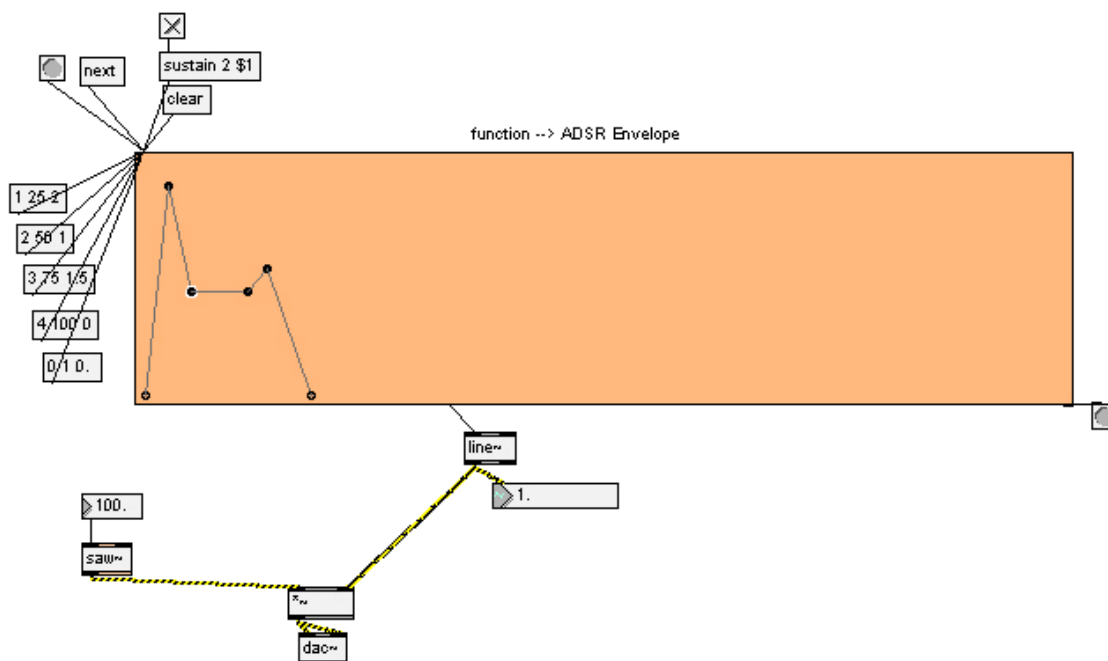


Fig. 5-20. Esempio di implementazione dell'involuppo di ampiezza, basato sulla definizione dei punti che formano la curva ADSR.

5.3.8 Effetti aggiuntivi

Come riferito in precedenza, non è stato sintetizzato il rumore residuo dovuto all'aria circolante all'interno della canna; tuttavia nel sintetizzatore è stata integrata una funzione per la simulazione di un rumore aggiuntivo, tipico dello strumento. Tale rumore è generato dalla pressione e dal rilascio della chiave metallica posta sul chanter sinistro della zampogna a chiave. Poiché tale chiave non è presente in tutti i modelli di zampogna, la funzione è attiva solo in modalità "zampogna a chiave" e viene implementata tramite la semplice esecuzione di una sequenza di campioni sonori pre-registrati (è stato registrato il rumore della pressione e del rilascio della chiave di una zampogna molisana "25"). L'esecuzione si innesca allorquando il sintetizzatore riceva i messaggi MIDI di *NoteOn* e *NoteOff* riferiti a particolari note, la cui diteggiatura prevede l'utilizzo della chiave (ad es. la tonica e la terza minore sulla scala del chanter sinistro). Tale accorgimento contribuisce a rendere più realistica la sintesi audio.

5.4 Alcuni esempi

A scopo esemplificativo, viene di seguito riportata una tabella con i collegamenti ad alcuni file audio disponibili nel cd allegato alla presente tesi e in rete (<http://www.ezampogne.tk>). La stima della qualità del sintetizzatore viene effettuata paragonando alcuni campioni sonori di zampogne autentiche (tratti dalle registrazioni effettuate) e i suoni artificiali equivalenti, generati tramite la tecnica di sintesi adottata nel programma realizzato e quella per *wavetable* (che, come detto in precedenza, risulta la tecnica più utilizzata nei comuni sintetizzatori degli aerofoni a sacco). Si nota come il sintetizzatore riesca a simulare più che discretamente i suoni delle zampogne dalle dimensioni più modeste, e quindi dai *pitch* più alti (ad es. le surdulina di misura “16 cm” e “27 cm” e la zampogna a chiave 2 ½ palmi), con una resa finale realistica, mentre il suono degli strumenti dalle dimensioni maggiori, e, quindi, dalle tonalità inferiori, può risultare percettivamente “artificioso” (ad es. la surdulina di misura “25 cm” e la zampogna a chiave 6 palmi); ciò è dovuto al maggior numero di formanti presenti nello spettro dei suoni con *pitch* bassi, i cui involuppi vengono approssimati maggiormente rispetto a quelli delle altre zampogne.

	Original Sound	<i>eZampognè</i> synthesis	Wavetable synthesis
Z. a chiave 2 ½ palmi Chanter sinistro	http://ezampogne.altervista.org/2pmMancaOriginal.mp3	http://ezampogne.altervista.org/2pmMancaSynth.mp3	http://ezampogne.altervista.org/2pmMancaWavetable.mp3
Z. a chiave 2 ½ palmi Bordone maggiore	http://ezampogne.altervista.org/2pmBordoneOriginal.mp3	http://ezampogne.altervista.org/2pmBordoneSynth.mp3	http://ezampogne.altervista.org/2pmBordoneWavetable.mp3
Z. a chiave 6 palmi Chanter destro	http://ezampogne.altervista.org/6pRittaOriginal.mp3	http://ezampogne.altervista.org/6pRittaSynth.mp3	http://ezampogne.altervista.org/6pRittaWavetable.mp3
Surdulina “16 cm” Chanter destro	http://ezampogne.altervista.org/s16RittaOriginal.mp3	http://ezampogne.altervista.org/s16RittaSynth.mp3	<i>n. a.</i>
Surdulina “27 cm” Chanter destro	http://ezampogne.altervista.org/s27RittaOriginal.mp3	http://ezampogne.altervista.org/s27RittaSynth.mp3	<i>n. a.</i>
Surdulina “25 cm” Chanter destro	http://ezampogne.altervista.org/s25RittaOriginal.mp3	http://ezampogne.altervista.org/s25RittaSynth.mp3	<i>n. a.</i>
Z. a chiave 3 ½ palmi <i>Sonata</i> (esecuzione di G. Salamone)	http://ezampogne.altervista.org/3pmSonataSalamone.mp3	http://ezampogne.altervista.org/3pmSonataSynth.mp3	<i>n. a.</i>

Tab. 5-21. Comparazione fra i suoni originali di zampogna e quelli ottenuti tramite il sintetizzatore realizzato e tramite la tecnica di sintesi per *wavetable*.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto sviluppato in questa tesi ha raggiunto l'obiettivo mirato alla realizzazione di uno strumento musicale elettronico completo, che emula il funzionamento di vari modelli di zampogna sui due livelli di sintesi sonora e controllo in tempo reale. La scarsa disponibilità di risorse economiche ha imposto l'adozione di tecnologie che, seppur valide per lo sviluppo di un prototipo, non risultano indicate per una produzione commerciale.

In particolare, l'utilizzo di semplici *push button*, per la rilevazione dell'occlusione dei fori digitali incide sull'usabilità del sistema: nonostante i rilevatori rispondano ai movimenti dell'utente efficacemente e senza introdurre notevole latenza, la corsa effettuata dalla leva di commutazione del circuito di ogni *push button* rischia di rendere innaturale il passaggio da una diteggiatura “tutto aperto” a “tutto chiuso” sulla canna sonora, non trascurabile nell'ottica di una performance virtuosistica sullo strumento. Tale problema può essere efficacemente risolto con l'adozione di sensori di tocco basati sui sistemi capacitivi.

In merito alla qualità della sintesi sonora, che a seconda del *pitch* della nota suonata, e quindi della complessità dell'involuppo spettrale, può risultare più o meno realistica, si può giungere alla conclusione che la tecnica adottata (sintesi sottrattiva) non risulta adatta per la totalità dei casi (ad es. fornisce risultati realistici nella rappresentazione di una zampogna “surdulina” ma non per una zampogna “a chiave” di grandi dimensioni), soprattutto sul piano del timbro; ciononostante, il criterio scelto per la definizione delle tonalità e del temperamento e lo scalamento dei caratteri spettrali forniscono buoni risultati soprattutto sul piano della fedeltà dell'intonazione (che è variabile e selezionabile in base ai criteri più tradizionali o agli standard musicali generici).

Lo studio effettuato sugli argomenti relativi alla sintesi audio e alle tecniche di *physical computing* aprono la strada a nuovi futuri progetti di ricerca, ad esempio per la:

1. realizzazione di un prototipo di interfaccia di controllo MIDI/OSC *wireless*, dotata di sensori capacitivi per il rilevamento del tocco;
2. integrazione di sensori capacitivi adiacenti ai bordi dei fori digitali in uno strumento originale, nell'ottica della realizzazione di una zampogna acustica dotata di uscita digitale (MIDI/OSC);
3. elaborazione di un sistema di sintesi per modelli fisici per la validazione dei parametri costruttivi delle zampogne, nell'ottica dell'individuazione delle caratteristiche costruttive "ottime", sia dal punto di vista dell'efficienza (massimizzazione della potenza acustica sviluppata) che da quello dei cromatismi (alterazioni della scala diatonica) ottenibili sullo strumento.

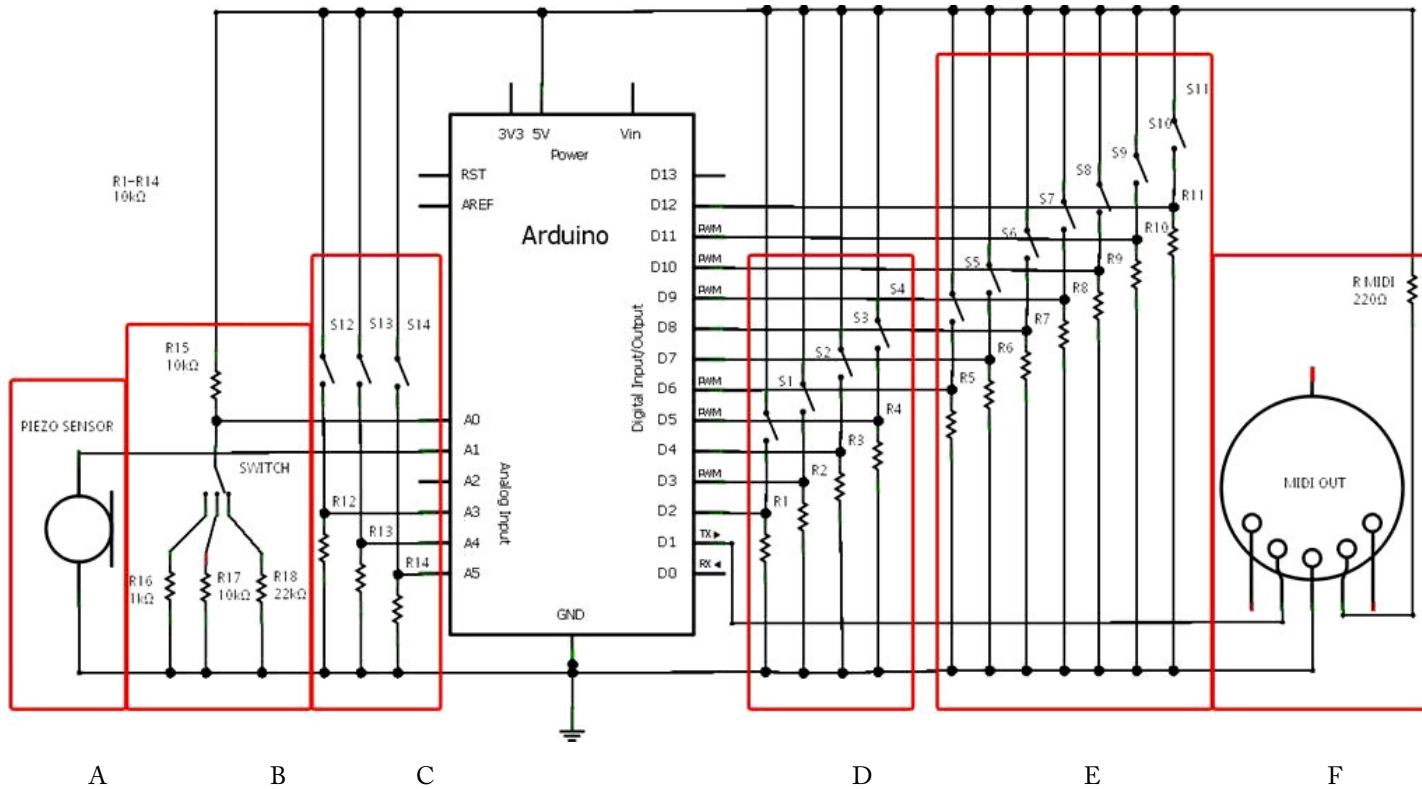


Fig. A-1. Schema elettrico dell'interfaccia di controllo realizzata: sensore piezoelettrico per il rilevamento della pressione dell'otre (a); commutatore per la selezione delle modalità di funzionamento (b); sensori tattili della canna bordone (c), del chanter sinistro (d) e di quello destro (e); porta MIDI Out (f).

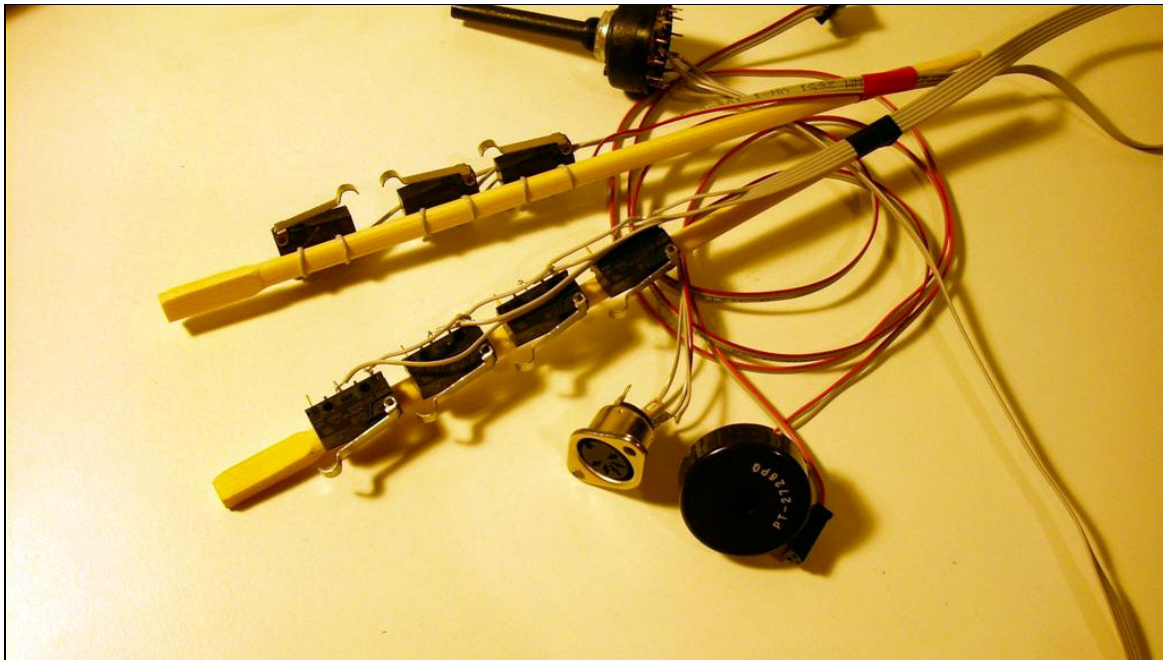


Fig. A-2. Fotografia di alcuni componenti dell'interfaccia di controllo (*push button*, porta MIDI Out, selettore della modalità, buzzer piezoelettrico).

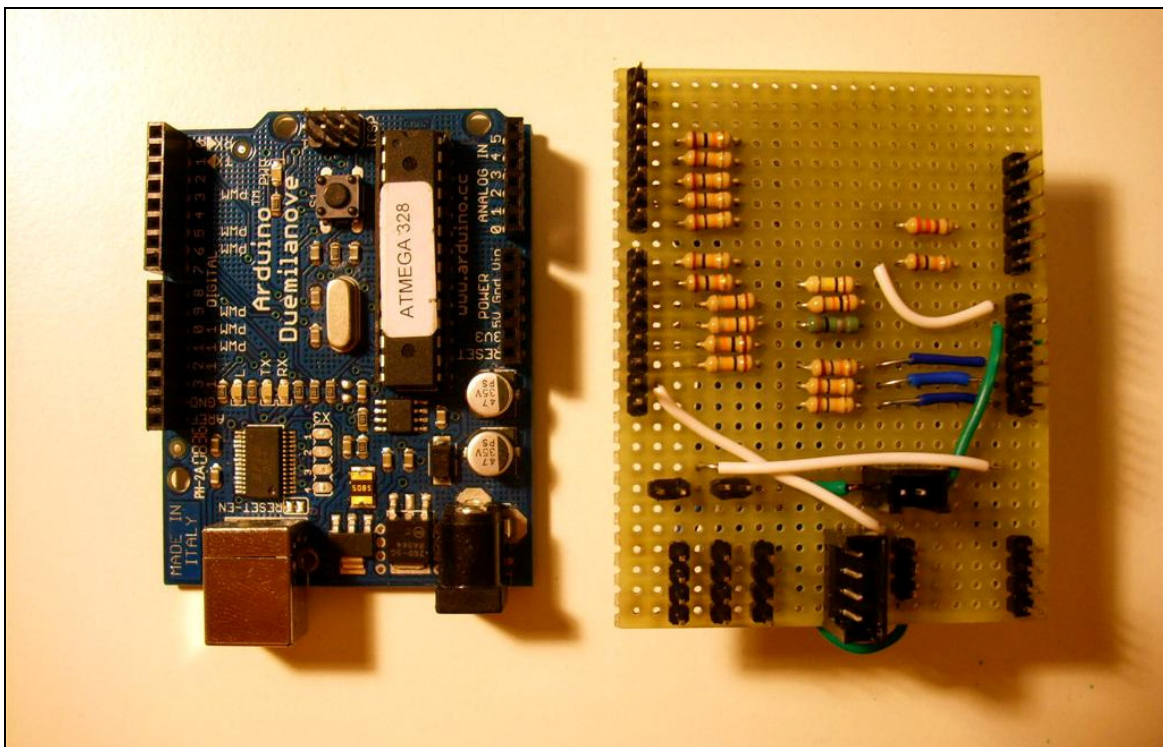


Fig. A-3. Fotografia della scheda Arduino Duemilanove e del circuito complementare realizzato, necessario per la connessione di tutti i componenti alla scheda di processing.

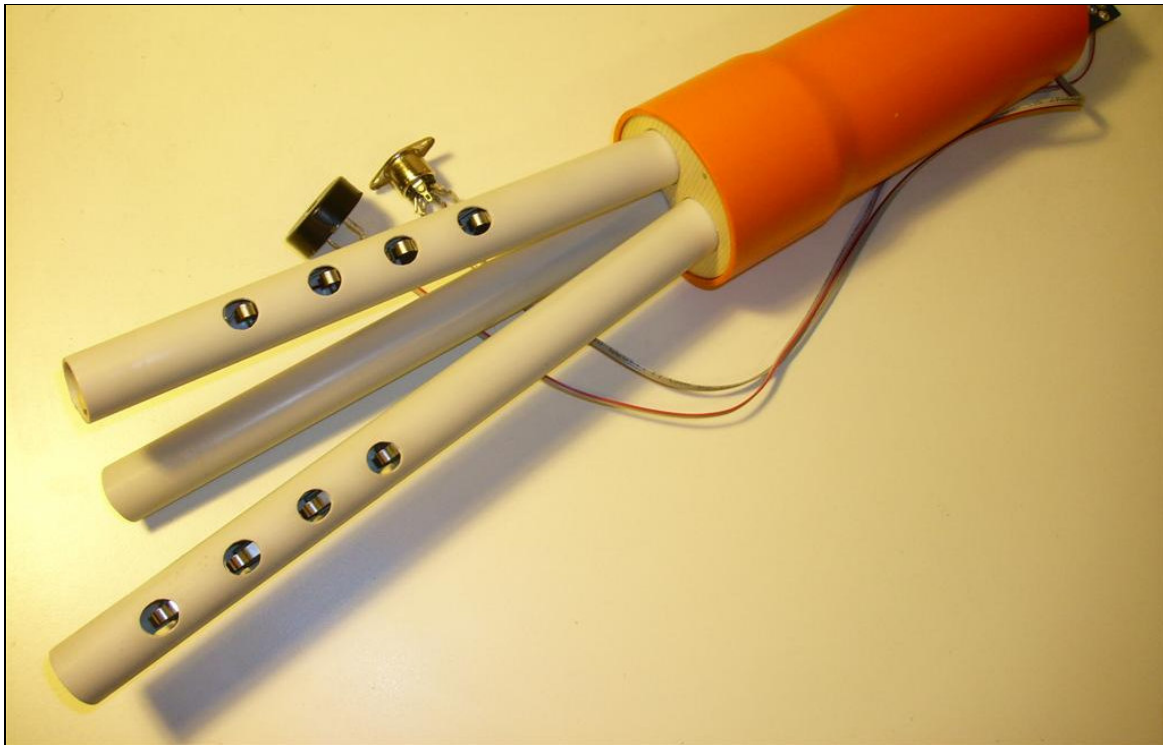


Fig. A-4. Fotografia delle canne dell'interfaccia montate nel blocco principale, che nasconde i circuiti e l'Arduino.

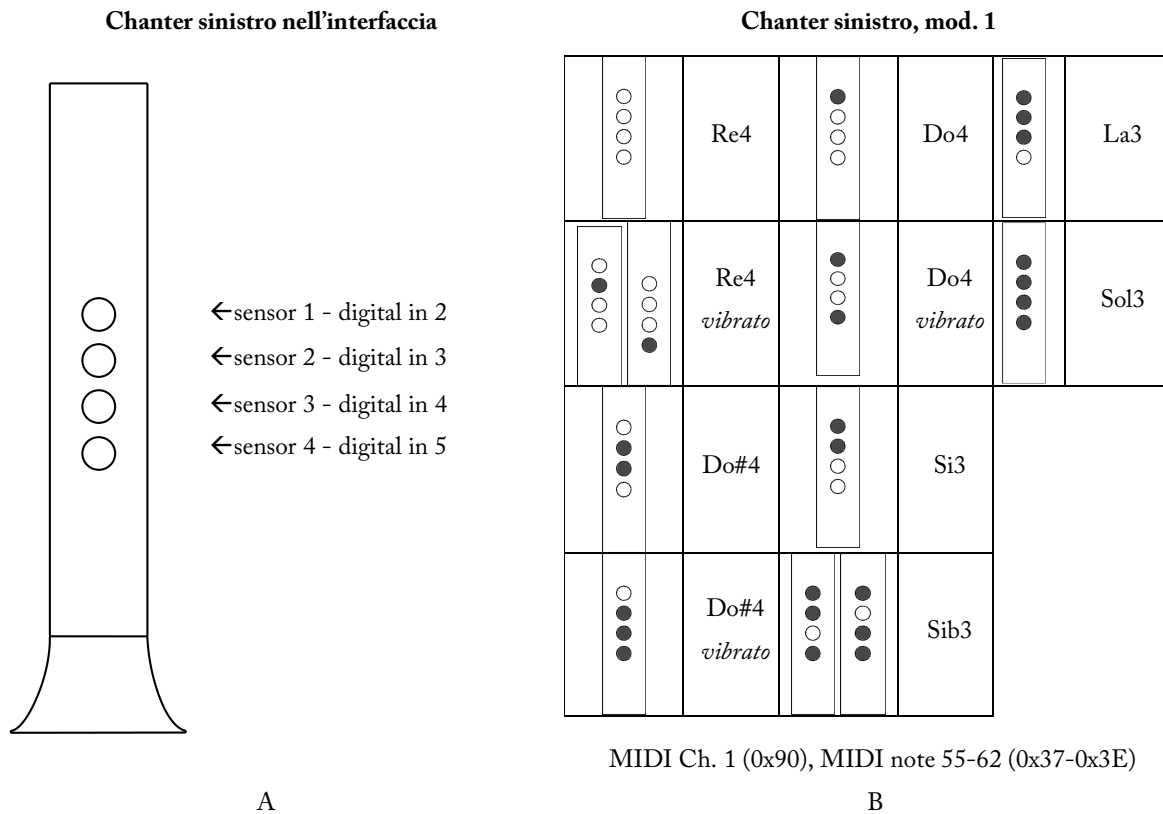


Fig. A-5. Schema degli abbinamenti sensore-foro (a) e lista completa delle diteggiature sul chanter sinistro in modalità 1. zampogna a chiave (b)

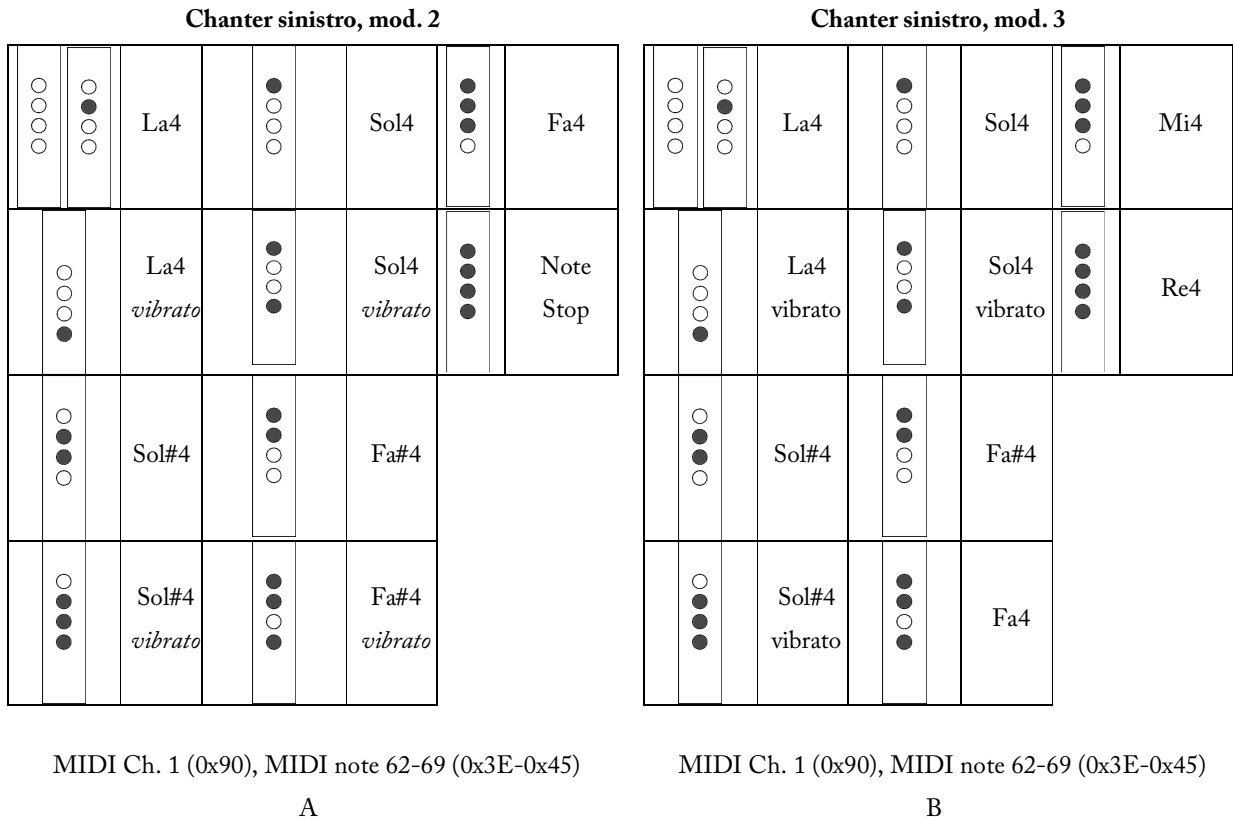


Fig. A-6. Lista delle diteggiature sul chanter sinistro in modalità 2. surdulina (a) e modalità 3. zampogna zoppa (b)

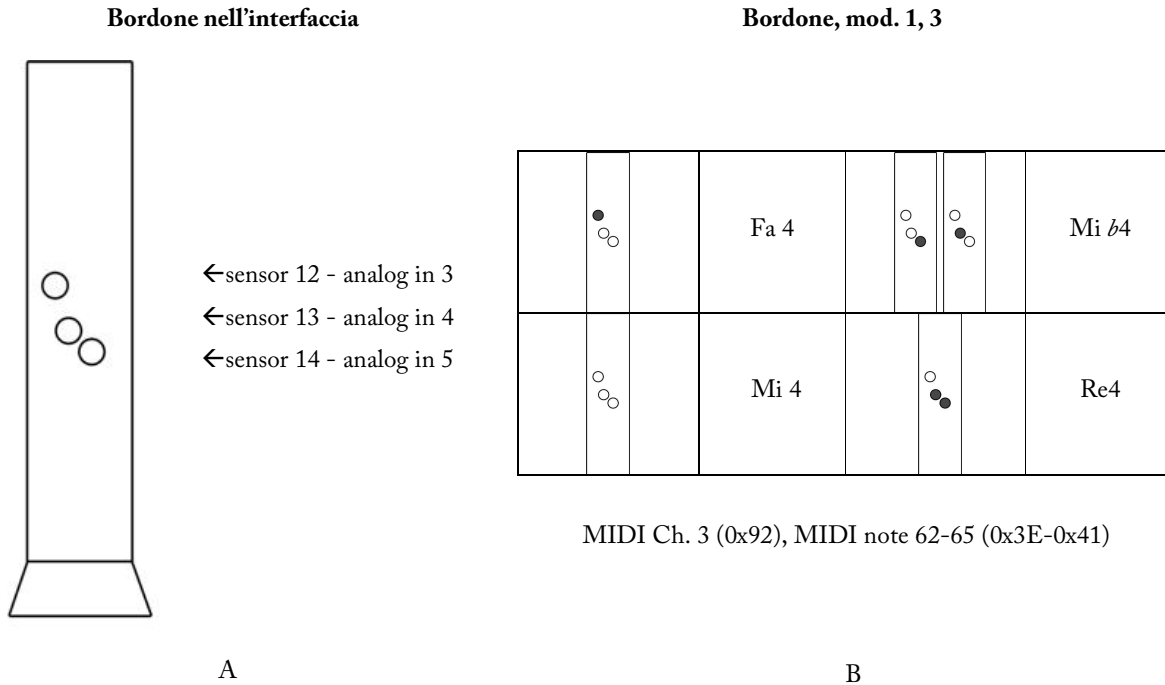


Fig. A-7. Schema degli abbinamenti sensore-foro (a) e lista delle diteggiature sul bordone in modalità 1. zampogna a chiave e 3. zampogna zoppa (b).

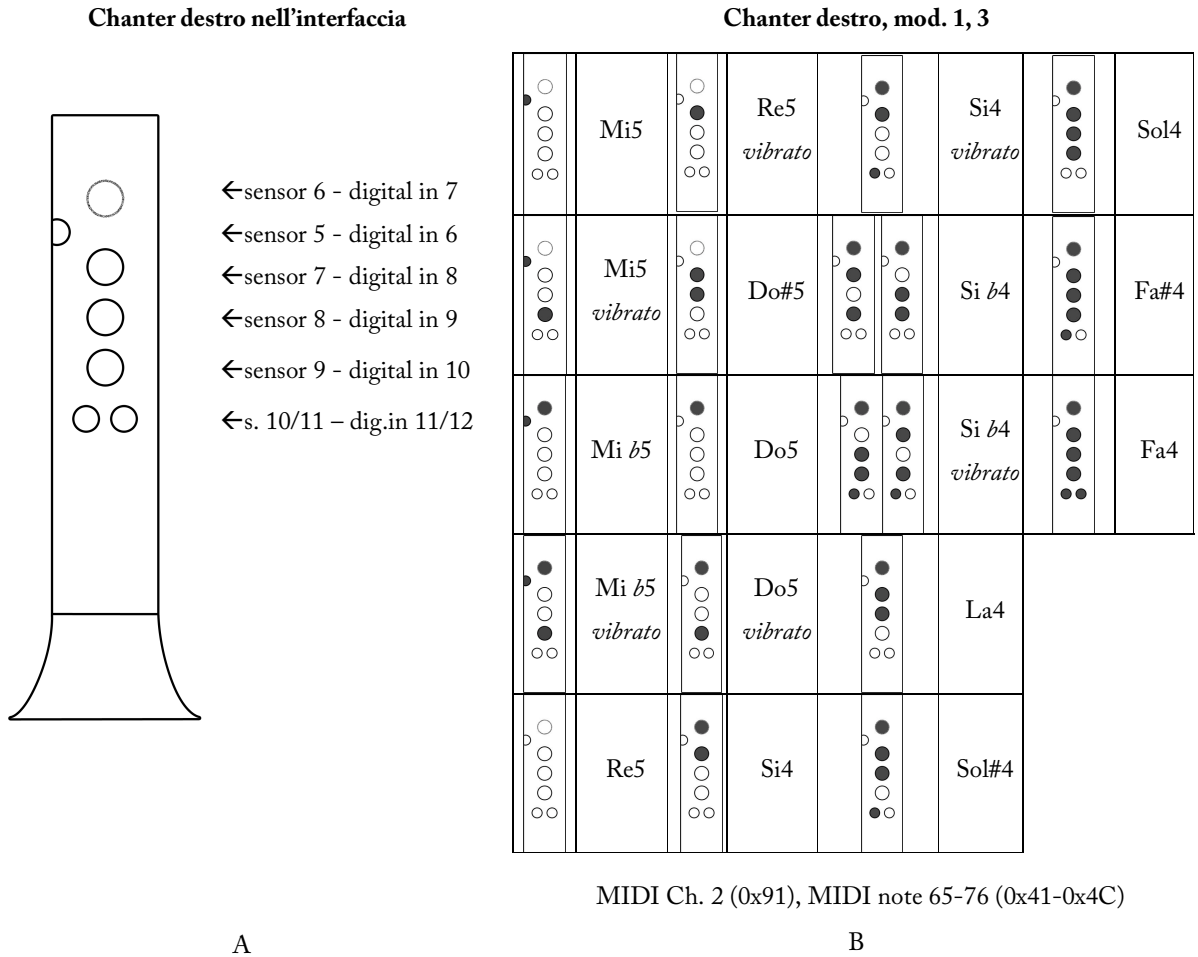


Fig. A-8. Schema degli abbinamenti sensore-foro (a) e lista completa delle diteggiature sul chanter destro in modalità 1. zampogna a chiave e 3. zampogna zoppa (b)

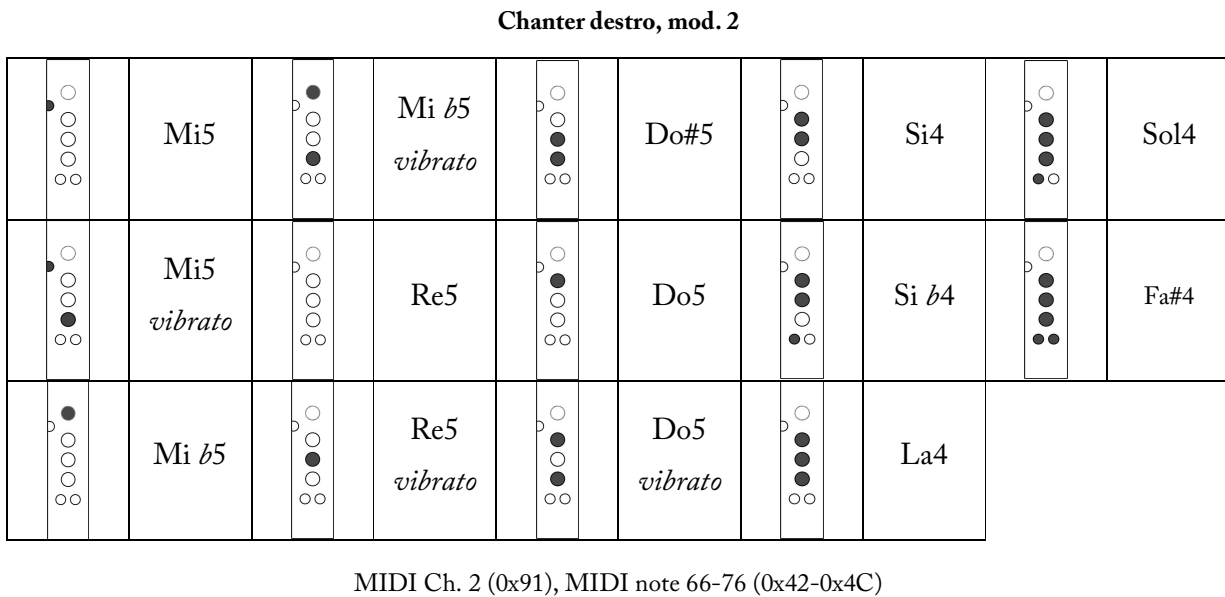


Fig. A-9. Lista delle diteggiature sul chanter destro in modalità 2. surdulina

Bibliografia

Testi:

- F. Guizzi – Guida alla musica popolare in Italia. Gli strumenti. LMI, 2002.
- F. Guizzi, R. Leydi – Le zampogne in Italia. Ricordi, 1985.
- M. Gioielli - La zampogna. Gli aerofoni a sacco in Italia. Iannone, 2005.
- A. H. Benade - I tubi sonori, la fisica degli strumenti a fiato. Zanichelli, 1966.
- The Diagram Group - Musical Instruments of the World: An Illustrated Encyclopedia. Sterling, 1976.
- D. O'Sullivan, T. Igoe - Physical computing, sensing and controlling the physical world with computers. Course Technology PTR, 2004.
- C. Roads – The computer music tutorial. MIT Press, 1996.
- V. Lombardo, A. Valle – Audio e multimedia. Apogeo, 2008.
- L. R. Rabiner, R. W. Schafer - Digital Processing of Speech Signals. Rainbow-Bridge Book Company, 1978.
- Wai C. Chu - Speech coding algorithms: foundation and evolution of standardized coders. Wiley-Interscience, 2003.
- F. Avanzini, G. De Poli – Algorithms for Sound and Music Computing, Fundamentals of digital audio processing, 2005-2008. (<http://smc.dei.unipd.it/education.html>)
- D. Rocchesso – Introduction to sound processing, Chapter 4, Sound Analysis, 2004. (<http://profs.sci.univr.it/~rocchess/SP/sp.pdf>)

Pubblicazioni:

- P. Tzevelekos, G. Kouroupetroglou - Acoustical analysis of woodwind musical instruments for virtual instrument implementation by physical modeling, 2004. (http://speech.di.uoa.gr/sppages/spppdf/acoustica2004_physicalmodeling.pdf)
- C. Cannon , S. Hughes , S. Ó Modhráin - EpipE: exploration of the Uilleann pipes as a potential controller for computer-based music, 2003.

- <http://www.sarc.qub.ac.uk/~somodhrain/palpable/NIMEPipesPaperFinal.pdf>
- X. Serra – State of the Art and Future Directions on Musical Sound Synthesis, 2007.
(<http://mtg.upf.edu/files/publications/5fc537-MMSP-2007-xserra.pdf>)
- G. P. Scavone - An Acoustic Analysis of Single-Reed Woodwind Instruments, with an Emphasis on Design and Performance Issues and Digital Waveguide Modeling Techniques, 1997. (<http://www.music.mcgill.ca/~gary/thesis.html>)
- P. Guillemain – A digital synthesis model of double-reed wind instruments, 2004.
(<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1289340.1289421>)
- P. Guillemain, J. Terroir - A simple dynamic tonehole model for real-time synthesis of clarinet-like instruments, 2005. (<http://www.music.mcgill.ca/~ich/research/misc/papers/cr1067.pdf>)
- X. Serra – A System for Sound Analysis/Transformation/Synthesis based on a Deterministic plus Stochastic Decomposition, 1989.
(<http://mtg.upf.edu/files/publications/PhD-Thesis-1989-xserra.pdf>)
- J. Haas – SALTO, A Spectral Domain Saxophone Synthesizer, 2001.
(<http://citeseerx.ist.psu.edu/legacyMapper?did=527296>)
- G. P. Scavone - THE PIPE: Explorations with Breath Control, 2003.
(<http://www.music.mcgill.ca/~gary/papers/nime03.pdf>)
- S. Hughes, C. Cannon, S. O'Modhrain - Epipe : A Novel Electronic Woodwind Controller, 2004. (http://www.nime.org/2004/NIME04/paper/NIME04_4A02.pdf)
- F. R. Moore – The dysfunctions of MIDI, Computer Music Journal 12(1), 1988.
- A. Freed, A. Schmeder – Features and Future of Open Sound Control version 1.1 for NIME, 2009. (<http://cnmat.berkeley.edu/system/files/attachments/Nime09OSCfinal.pdf>)
- X. Serra – Musical Sound Modeling with Sinusoids plus Noise, 1997.
(<http://mtg.upf.edu/files/publications/MSM-1997-Xserra.pdf>).