

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA SEDE DI CESENA**

SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA CON SEDE A CESENA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

TITOLO DELL'ELABORATO

**Progetto di un circuito di elaborazione
dati per l'analisi reologica di singoli
oggetti in tempo reale**

Elaborato in

ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI L-A

Relatore

Prof. Ing. Aldo Romani

Correlatore

Ing. Enrico Macrelli

Presentata da

David Sanzani

Sessione Prima

Anno Accademico 2011 / 2012

Sommario

Introduzione	3
Metodi di misurazione per valutare la maturazione della frutta	4
Metodi di misurazione distruttivi	5
Metodi di misurazione non distruttivi	9
Approccio Elettrochimico.....	9
Approccio Elettromagnetico - Tecniche Spettroscopiche	11
Approccio Meccanico.....	18
Progetto del sistema elettronico	26
Implementazione del sistema su scheda elettronica autonoma	28
Scheda Madre	29
Scheda Display per la visualizzazione dati.....	43
Scheda di potenza per l'attuazione	49
Piattaforma per analisi reologiche di singoli oggetti	51
Campagna di Misura	52
Conclusioni	55
Sviluppi futuri	56
Ringraziamenti.....	57
BIBLIOGRAFIA	58

Introduzione

La scienza che studia gli equilibri raggiunti dalla materia deformata per effetto di sollecitazioni, a prescindere dal fatto che si tratti di solidi o fluidi, è detta reologia. La viscosità in particolare, è la grandezza fisica più rilevante in questo ambito perché permette di quantificare la resistenza dei fluidi all'attraversamento, e quindi la coesione interna del fluido. Essa dipende da parametri caratteristici interni della materia come la composizione chimica, lo stato di aggregazione e da parametri esterni come temperatura, pressione, ma anche dal tipo di forza di sollecitazione applicata. Grazie a studi reologici è quindi possibile ricavare informazioni di diverso tipo sulla struttura dei materiali ed estrarne le proprietà principali come densità, durezza, elasticità, allo scopo di tracciarne un profilo dettagliato.

Questo elaborato propone lo studio di un sistema ed il conseguente sviluppo di un'architettura elettronica versatile, capace di effettuare analisi reologiche in tempo reale su singoli oggetti di varia natura, sfruttando diversi metodi e tecnologie elettroniche a disposizione. Un caso particolare su cui ci si è soffermati per sviluppare il sistema riguarda l'implementazione di tecniche innovative di produzione e selezione dei prodotti agricoli. Per rimanere competitivi e stare al passo con queste problematiche è necessario investire nella ricerca ed in metodi efficaci per migliorare la qualità della produzione agricola e sfruttare al massimo le proprie risorse. Fino a pochi anni fa l'analisi della qualità della frutta era di tipo distruttivo, al giorno d'oggi è possibile effettuare analisi di tipo non-distruttivo su prodotti ortofrutticoli che permettono di conservare l'integrità dei campioni testati e velocizzare la catena della selezione e quindi della qualità dei frutti.

La prima parte di questo elaborato descrive una panoramica dei principali metodi per l'analisi distruttiva e non-distruttiva delle proprietà reologiche di prodotti agro-alimentari. Nello specifico sono trattate le principali tecniche di analisi della maturazione di prodotti ortofrutticoli, con una panoramica delle procedure attualmente adottate e disponibili. Viene poi approfondita l'analisi della maturazione mediante tecniche acustiche, oggetto di studio, capaci di fornire numerosi vantaggi rispetto altre tecniche di tipo non-acustico.

La seconda parte di questo elaborato presenta un prototipo elettronico realizzato su millefori capace di effettuare l'analisi reologica con tecniche acustiche di diversi oggetti, prendendo come campioni diversi tipi di prodotti agricoli, infine sono valutate le caratteristiche elettriche e le prestazioni. Tale prototipo è stato progettato e costruito per essere versatile ed adattabile a diverse tipologie di applicazioni, mantenendo costi ridotti per renderlo adatto ad eventuali applicazioni industriali.

Metodi di misurazione per valutare la maturazione della frutta

La valutazione della maturazione della frutta nella filiera produttiva si effettua principalmente in due fasi. La prima considera la cosiddetta maturazione fisiologica del prodotto ortofrutticolo e consiste nel determinare il momento del raccolto analizzandone i diversi parametri in loco, ovvero quando i frutti sono presenti sulla pianta. Ancora oggi in ambienti rurali ci si affida alla saggezza popolare ed all'esperienza dei coltivatori per determinare il periodo giusto o favorevole per effettuare il raccolto, ma negli ultimi decenni sono state sviluppate diverse metodologie e tecniche affidabili che hanno rimpiazzato le vecchie abitudini in favore delle nuove tecnologie. L'importanza di raccogliere la frutta nel giusto periodo non dev'essere sottovalutata, poiché errori grossolani possono portare all'insorgere di alterazioni fisiologiche, causando una conseguente perdita di qualità ed un possibile deterioramento precoce del prodotto finale. La seconda fase detta anche maturazione commerciale, si effettua in un contesto post-raccolta, l'analisi del prodotto ortofrutticolo è uno *step* fondamentale nella catena di produzione e distribuzione agroalimentare perché dovrà determinare il momento migliore di vendita e consumo. Le qualità organolettiche ed estetiche dei prodotti ortofrutticoli dovranno per prima cosa essere conformi alle direttive CE, alle norme per la commercializzazione internazionali UN/ECE, ed alle norme redatte dalla Codex Alimentarius Commission. Queste norme stabiliscono diverse regole per i processi produttivi, ma anche criteri oggettivi per la classificazione della frutta in categorie di qualità e le caratteristiche necessarie affinché un prodotto possa essere immesso sul mercato. La filiera agroalimentare dev'essere quindi orientata verso un'ottica di mercato, al fine di soddisfare le esigenze del consumatore finale ed ottenere maggiori consumi. In entrambe le fasi di valutazione possiamo distinguere due grandi classi di metodologie per la valutazione della maturazione della frutta, suddivise in base all'impatto che esse hanno sul frutto: distruttivo o non distruttivo.

Metodi di misurazione distruttivi

I metodi di misurazione distruttivi prevedono campionamenti casuali su una popolazione di prodotti ortofrutticoli, destinati sì alla misurazione, ma anche alla distruzione ed al deterioramento. Si tratta quindi di metodologie invasive, ma anche molto efficaci perché permettono di verificare direttamente la qualità del prodotto e confrontare le sue caratteristiche con indici di maturazione e parametri analitici precisi e di facile comprensione. Purtroppo questi metodi presentano diversi difetti, poiché la maturazione della frutta è legata a diversi fattori ambientali che possono variare sensibilmente, come quantità di luce, posizione del frutto sulla pianta e condizioni di salute della stessa; effettuando una misurazione statistica su un campione rappresentativo si ricavano e analizzano dati approssimativi e spesso non corrispondenti alla realtà. Questi elementi che contraddistinguono le misurazioni effettuate tramite metodi distruttivi, comportano una serie di problemi, tra cui sprechi di risorse, lente procedure di analisi e l'impossibilità di effettuare misurazioni incrociate sul campione, fattori che non si conciliano ad un modello di tipo industriale. Per la facilità di utilizzo ed applicazione risultano essere ancora utilizzati in diverse realtà agricole, quindi ne elencheremo le diverse tipologie esistenti.

Penetrometro

La più comune tra le tecniche distruttive sfrutta macchinari più o meno complessi chiamati penetrometri (Magness-Taylor test), i quali utilizzano come indice di misurazione la durezza della polpa del frutto. Come si vede in Figura 1, questi parametri sono ottenuti inserendo nel frutto un puntello cilindrico che andrà a verificare la resistenza dello stesso ad essere perforato e quindi la fermezza della sua polpa. Sono state redatte diverse tabelle e grafici di equivalenza che mostrano il rapporto tra forza di penetrazione e pressione realmente esercitata sul frutto in base al puntello utilizzato. Esistono norme specifiche redatte dall'istituto tedesco per la standardizzazione DIN (Deutsches Institut Fur Normung e. V.) [1] che regolamentano la redazione di queste tabelle in funzione di specifici *range* legati al tipo di frutto ed al giusto puntello di penetrazione da utilizzare (vedi Tabella 1).

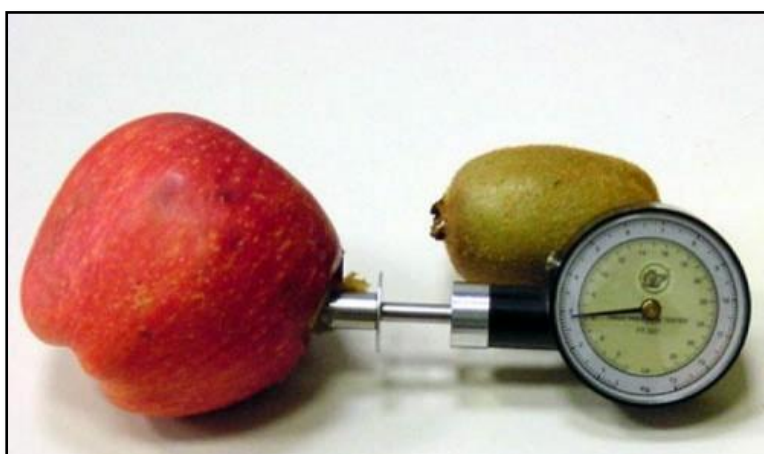


Figura 1: Penetrometro (Magness-Taylor test) [2].

Con il penetrometro è possibile ottenere risultati piuttosto accurati della fermezza del frutto, ma non è detto che questi valori rispecchino la reale condizione del frutto e soprattutto le condizioni dell'intero lotto. Ulteriori fattori d'errore possono essere causati dalle differenti quantità di azoto ed acqua presenti nei diversi frutti campione [2].

Lettura in penetrometro (g)	Pressione Esercitata (Kg/cm²)
100	0,20
1000	1,99
2000	3,98
3000	5,97
4000	7,96
5000	9,95
6000	11,94
7000	13,93
8000	15,92
9000	17,90
10000	19,89
11000	21,88
12000	23,87
13000	25,86

Tabella 1: Range per la standardizzazione DIN del penetrometro. Appropriato per mela, pera, pesca o kiwi con un puntello di penetrazione di 8mm (superficie 0.5cm²) [1].

Rifrattometro

Un'altra tipologia di tecnica distruttiva sfrutta la rifrazione ottica utilizzando strumenti chiamati rifrattometri (vedi Figura 2). Questi strumenti sono molto versatili e di facile utilizzo, infatti sono spesso utilizzati anche in campo medico per misurare la glicemia nelle persone affette da diabete, ma presentano non pochi difetti: l'accuratezza delle misurazioni è influenzata fortemente dalla temperatura in cui vengono effettuate e dalla corretta calibrazione, inoltre in un'ottica di produzione ortofrutticola eredita i difetti delle metodologie distruttive. Il principio su cui si basa la misurazione tramite rifrattometro è la valutazione dell'indice di rifrazione di un liquido, nel nostro caso il succo del frutto. Si posiziona la goccia campione sulla superficie di misurazione dello strumento, un illuminatore proietta un fascio di luce che attraversa il liquido per poi essere deviato all'interno dello strumento ed infine proiettato su una scala precedentemente tarata. Questi parametri determinano l'indice di rifrazione che sarà direttamente correlato ad una proprietà fisica od alle sostanze nutrienti disciolte all'interno del frutto, come la concentrazione di zuccheri (Misurazione Brix/RSR: Residuo Secco Rifrattometrico [3]). Più alta è la densità del liquido, minore è la velocità di attraversamento della luce e quindi l'indice di rifrazione corrispondente sarà maggiore.



Figura 2: Rifrattometro portatile [3].

Analisi specifiche di laboratorio

Esistono altre metodologie distruttive che possono dare risultati attendibili e soddisfacenti, ma necessitano di specifici strumenti di laboratorio e quindi di analisi chimiche accurate che richiedono tempo e non sono adatte ad una realtà industriale. Proprio per questi motivi sono sfruttate maggiormente per analizzare prodotti finiti già trasformati come ad esempio i succhi di frutta. Un primo esempio può essere l'utilizzo di una procedura chimica di analisi volumetrica chiamata titolazione, che permette la determinazione dell'acidità del frutto campione, usata come indice di misurazione della maturazione. Gli strumenti adatti per questo tipo di misurazione sono il titolatore pHmetrico o i pHmetri. A seconda del frutto considerato e del suo grado di maturazione varierà la concentrazione di un acido predominante. Negli agrumi e nel ribes prevarrà l'acido citrico, nelle mele, pere, prugne, albicocche, ciliegie vi è una prevalenza di acido malico, mentre per l'uva a predominare è l'acido tartarico. Altri indici interessanti possono essere il calcolo del livello di amido tramite Test di Lugol [4] (ad esempio sulle mele) o anche il rapporto zuccheri-acidi per valutare il sapore del frutto (usato anche in enologia). In Figura 3 si può visionare un esempio di strumentazione per analisi da laboratorio.



Figura 3: Titolatori di laboratorio, pHmetro portatile Eutech XSPH6.

Metodi di misurazione non distruttivi

Abbiamo visto che le metodologie distruttive comportano non pochi problemi, primo fra tutti la non adattabilità ad una realtà produttiva industriale: difficilmente possono essere implementate in macchinari on-line che svolgono operazioni in serie. Per questo motivo negli ultimi decenni, per venire incontro alle esigenze di mercato, abbiamo visto un progressivo interesse e cospicui investimenti verso nuove tecnologie. Grazie allo sviluppo della sensoristica si sono aperti nuovi scenari d'approccio al problema consentendo l'applicazione di nuove tecniche rapide e non invasive. Questo ha portato anche all'impiego crescente di nuove metodologie non distruttive che hanno evidenziato la correlazione tra proprietà del prodotto ortofrutticolo (chimiche, fisiche, biologiche) al suo grado di maturazione, quindi si sono studiati ed elaborati nuovi indici che permettono di avere una panoramica più completa sulle caratteristiche interne e sullo stadio di maturazione del frutto. Queste metodologie oltre ad essere non-invasive ed a mantenere integro il campione analizzato risolvono il problema dei campionamenti casuali, permettendo di ottenere risultati attendibili e ripetibili su ogni singolo frutto. Ciò consente di seguire l'evoluzione fisiologica della partita voluta dalla raccolta allo stoccaggio fino alla conservazione, a beneficio di risorse e tempi di elaborazione drasticamente ridotti. Le metodologie non distruttive sono applicabili tramite l'impiego di diverse tipologie di strumentazioni e macchinari, capaci di effettuare l'analisi del campione considerato utilizzando uno tra questi metodi d'approccio: elettrochimico, elettromagnetico o elettromeccanico [4]. Ogni tipo di approccio valuterà quindi diverse proprietà del frutto e ne elaborerà particolari indici di maturazione più o meno complessi.

Approccio Elettrochimico

I metodi tradizionali di analisi chimica come quelli accennati in precedenza non sono facilmente adattabili ad un modello competitivo, sono limitati dagli alti costi, dalla necessità di avere a disposizione laboratori e personale specializzato. Interessanti strumentazioni che vengono incontro alle esigenze di mercato sfruttano un approccio di tipo elettrochimico: analizzano il frutto per studiarne le sostanze volatili emesse, al fine di valutarne la maturazione ed altre caratteristiche fisiologiche come aroma e sapore. Pochi decenni fa sarebbe stato impensabile sostituire l'esperienza umana nel constatare, annusando un frutto, le fragranze, gli aromi, lo stato di maturazione dello stesso ed eventuali cattivi odori sintomi di malattie o parassiti. Considerando l'importanza di

questo tipo di analisi ci si è chiesti come poter sfruttare questo approccio semplificandone le procedure e rendendolo adatto ad essere applicato alla filiera agroalimentare.

Naso Elettronico

Il principio di funzionamento del naso elettronico è abbastanza semplice, dopo essere stato tarato e fornito di un archivio per effettuare analisi comparative, lo strumento campiona la miscela odorosa direttamente dal frutto. La parte di *sensing* viene realizzata da una complessa matrice di sensori, ognuno dei quali fornisce informazioni parzialmente indipendenti a quelle percepite dagli altri, che insieme danno una panoramica complessiva dello stato del frutto. I segnali forniti dai sensori sono interfacciati a dispositivi elettronici di condizionamento che ne permettono la corretta acquisizione, successivamente viene comparata l'impronta olfattiva della miscela con le concentrazioni presenti nel database. In alcuni casi il naso elettronico può essere utilizzato in concomitanza con altre metodologie non-distruttive che analizzeremo in seguito. In Figura 4 è mostrato un naso elettronico all'opera mentre analizza un kiwi.

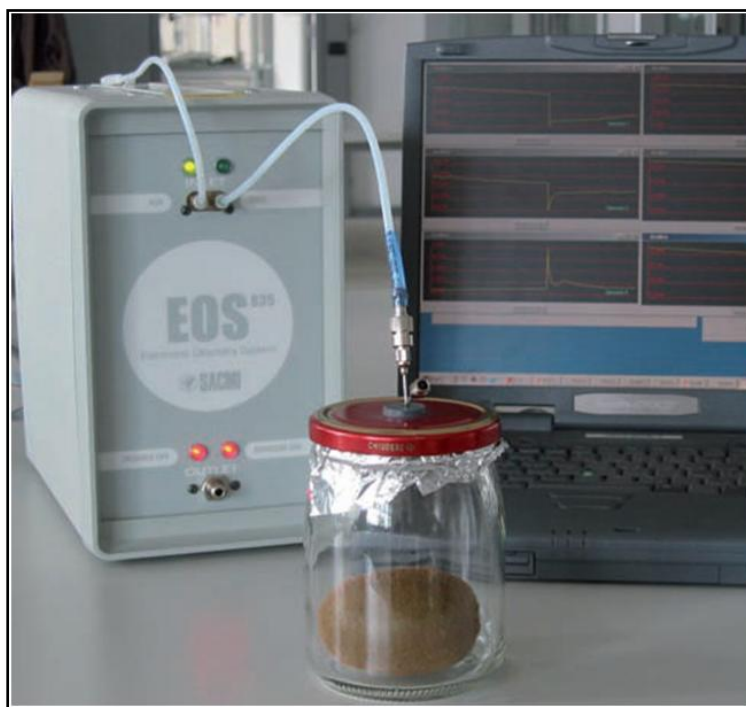


Figura 4: Naso Elettronico Eos Sacmi [5].

Approccio Elettromagnetico - Tecniche Spettroscopiche

Strumentazioni all'avanguardia sfruttano metodologie non distruttive utilizzando un tipo d'approccio elettromagnetico. In Figura 5 è mostrato lo spettro elettromagnetico e la fascia del visibile.

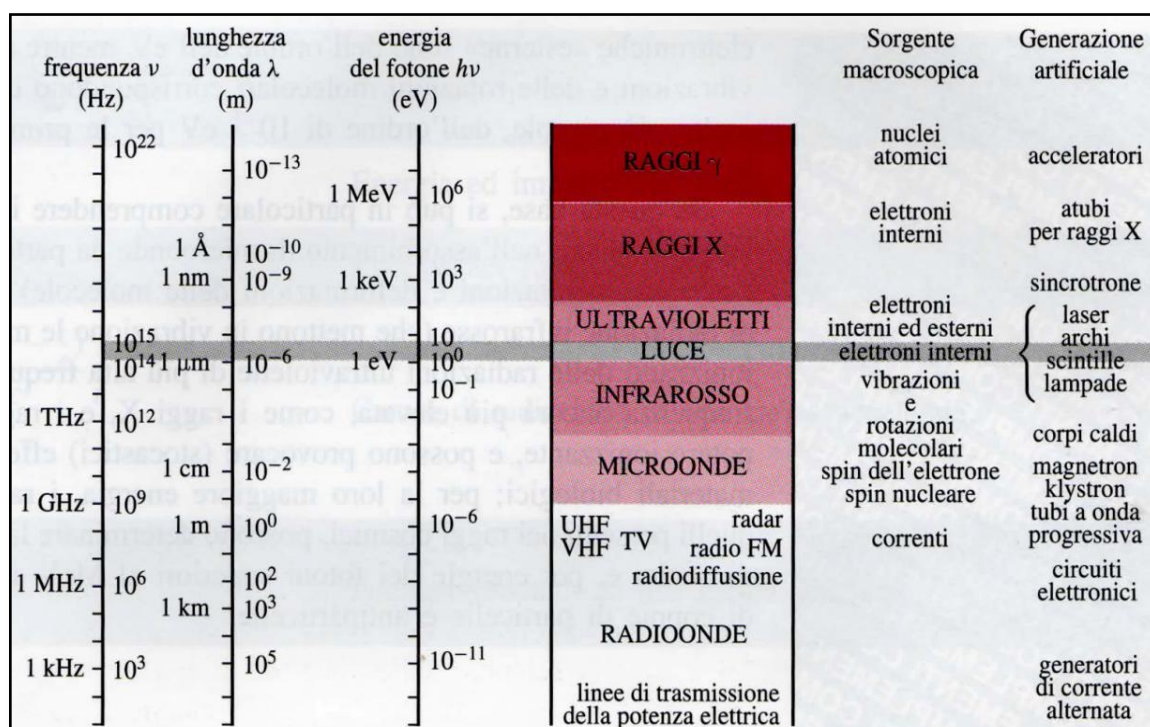


Figura 5: Spettro Elettromagnetico e fascia del visibile [6].

Queste metodologie si fondano sullo studio dell'assorbimento e della deviazione di onde elettromagnetiche, ed a considerazioni su transizioni dei livelli energetici delle particelle considerate. Applicate alla frutta permettono di determinarne specifiche proprietà come il grado di maturazione, patologie e malattie latenti, evidenziare la presenza di tossine nocive alla salute umana od a tracciare lo sviluppo fisiologico del campione. L'importanza dello studio delle proprietà elettromagnetiche quindi è fondamentale per la raccolta d'informazioni su caratteristiche interne specifiche, che sarebbero impossibili da determinare in modo così preciso con la maggior parte delle altre metodologie disponibili. Purtroppo l'accessibilità a questi metodi è limitata da costi molto elevati e dalla necessità

di avere a disposizione macchinari avanzati. La spettroscopia studia l'interazione tra radiazioni elettromagnetiche e tutto ciò che compone il materiale oggetto dello studio, sia esso composto da atomi, ioni o molecole più complesse. Il principio di funzionamento non è semplice da applicare senza avere strumentazioni specifiche ed avanzate, ma è molto efficace e preciso: si eccita il campione con diverse tipologie di radiazioni, principalmente di tipo infrarosso (IR), a radiofrequenza (RF), ma anche raggi-X, poi si misurano diversi parametri come l'assorbimento energetico e la risposta del campione. Infatti quando la frequenza della radiazione incidente coincide con la frequenza di eccitazione/risonanza di una molecola o atomo, questi iniziano ad assorbire l'onda e quindi la sua energia, inducendo una conseguente modifica della forma a causa degli elettroni che transitano da stati fondamentali a stati eccitati.

Spettroscopia a Risonanza Magnetica Nucleare

La risonanza magnetica nucleare (NMR) è una tecnica nata osservando il comportamento dei dipoli magnetici (aghi magnetici o spire) immersi in un campo magnetico. I dipoli magnetici sono caratterizzati da un determinato momento di dipolo magnetico legato alle caratteristiche magnetiche degli aghi o dall'intensità di corrente che percorre le spire. Una volta soggetti alle linee di un campo magnetico, i dipoli tendono ad orientarsi in base alle loro caratteristiche ed alla disposizione dei poli Nord e Sud. [6] Queste considerazioni possono essere applicate su nuclei atomici o molecole, idealizzabili come dipoli magnetici. Qui entra in gioco la risonanza magnetica nucleare, una tecnica che permette di studiare l'assorbimento energetico del campione voluto irradiandolo con onde a radiofrequenze variabili. La reazione all'irradiazione e le differenze di energia misurabili dipendono esclusivamente dal campione e quindi dai nuclei di molecole, atomi o isotopi. Applicando questa tecnica ad un campione di frutta è possibile quindi caratterizzare la composizione chimica interna del frutto ottenendo una panoramica sul suo sviluppo fisiologico ed alle sue caratteristiche intrinseche, in questo ambito la risonanza magnetica dell'idrogeno è quella che fornisce i dati più interessanti. Un'altra applicazione della risonanza magnetica è una tecnica biomedica di *imaging* (vedi Figura 6), si tratta della risonanza magnetica funzionale (fMRI - Functional Magnetic Resonance Imaging). Le prime applicazioni vennero eseguite in campo medico per ottenere in modo non invasivo l'immagine interna di determinati organi del corpo umano, primo fra tutti il cervello. Il principio di funzionamento è lo stesso dell'NMR, ma permette di ottenere un'immagine tridimensionale del campione grazie alla risonanza dell'idrogeno contenuto nell'acqua dei tessuti analizzati [7].

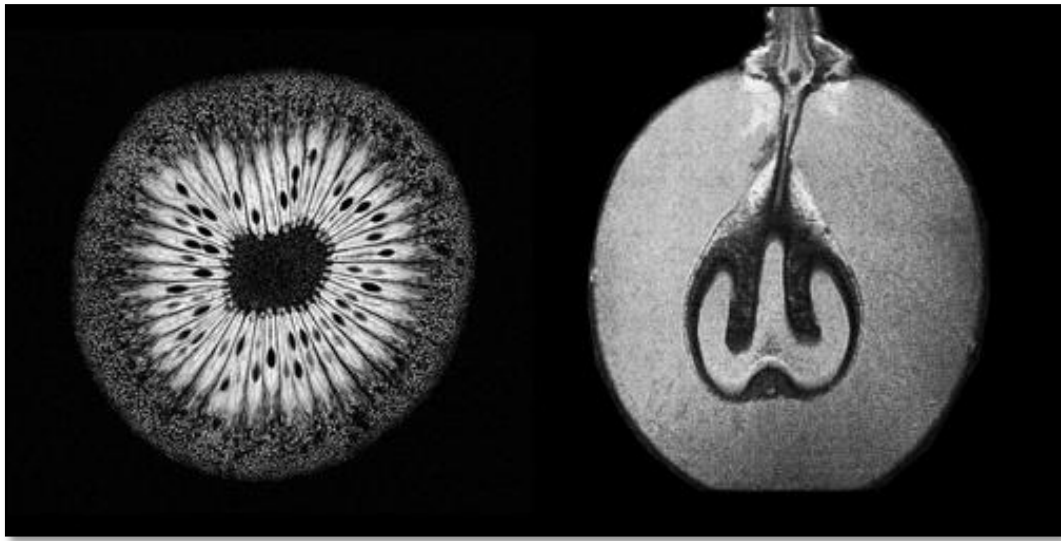


Figura 6: Risonanza Magnetica di un kiwi [8] e di un chicco d'uva di pinot nero [9].

Spettroscopia Infrarossa

Come si può notare dalla Figura 5, le radiazioni infrarosse (IR) sono comprese in una banda di frequenze tra 10^{12} e 10^{14} Hz, le rispettive lunghezze d'onda sono dell'ordine dei micron e variano dai $0.76 \mu\text{m}$ ai $500 \mu\text{m}$. Nelle applicazioni a spettroscopia infrarossa si possono distinguere tre regioni fondamentali [7]: infrarosso vicino (NIR) legata alle armoniche superiori, infrarosso medio (MIR) delle vibrazioni fondamentali ed infrarosso lontano (FIR) legato alle rotazioni. Le tecniche sfruttate in queste regioni sono quindi differenti tra loro, la più utilizzata in ambito ortofrutticolo è la NIRs (Near Infrared Spectroscopy, banda dei $0.75\text{-}2.5 \mu\text{m}$), ma ne esistono altre che possono essere sfruttate per altre applicazioni: MIRs (Medium Infrared Spectroscopy, banda dei $2.5\text{-}25 \mu\text{m}$) e RAMAN (Raman Scattering, banda dei 2.5 a $500 \mu\text{m}$). Queste tecniche differiscono principalmente tra loro per il fatto che le metodologie NIRs e MIRs riguardano l'assorbimento IR del campione, mentre la RAMAN ne verifica lo *scattering* (rifrazione). La metodologia NIRs ha grandi potenzialità e può essere impiegata in diversi modi. Essendo una tecnica spettroscopica si basa sullo studio dello spettro d'assorbanza e dello spettro residuo generato dal campione di frutta dopo esser stato attraversato da un fascio di luce infrarossa. I maggior pregi di questa tecnica sono la rapidità con cui è possibile

analizzare i campioni, la varietà di esami applicabili e la facile ripetibilità della misura. Inoltre è estendibile ad un ampio numero di campioni eterogenei tra loro.

Tralasciando i costi elevati, non è comunque un metodo esente da difetti in quanto la calibrazione è un processo lungo a cui si deve dedicare particolare attenzione, infatti è necessaria una campagna statistica di taratura incrociata al fine di ottenere una precisa curva di calibrazione, utilizzando anche altre metodologie distruttive in supporto. Nonostante i difetti permette di estrapolare parametri interessanti del campione come la durezza della polpa, il residuo secco solubile, ma anche parametri più complessi come l'amido, il contenuto degli antiossidanti antociani e polifenoli, gli zuccheri semplici presenti (glucosio, fruttosio, saccarosio, inositolo) e gli acidi organici (citrico, malico, quinico) [4]. La versatilità di questa tecnica ha suscitato molto interesse ed ha portato allo sviluppo di diversi prototipi e strumentazioni adattabili ad un sistema *online*. Tra le strumentazioni portatili possiamo accennare i DA-Meter SINTELEIA brevettati dal Dipartimento di Colture Arboree dell'Università di Bologna, che utilizzano come indice di misurazione il DA (Differenza di Assorbanza). Tra le strumentazioni *online* possiamo citare la serie di macchinari ed impianti industriali TASTE TECH (vedi Figura 7) [10].



Figura 7: Macchinario online Taste Tech T1[10].

Tecnica della Fluorescenza

La fluorimetria si prefigge di misurare la luce emessa per fluorescenza dopo aver eccitato il campione con radiazioni a lunghezza d'onda note. Permette quindi uno studio qualitativo delle sostanze presenti nel frutto, ma anche un'analisi di tipo quantitativa, dal momento che l'intensità emessa è correlata alla quantità di sostanza fluorescente presente.



Figura 8: Fluorimetro Hansatech M-PEA a fotodiodi per rivelare la clorofilla nelle piante [11].

L'utilizzo di questa tecnologia permette quindi di analizzare la fluorescenza di molecole organiche presenti nel frutto responsabili dei pigmenti, ma anche del sapore. Partendo dal presupposto che la concentrazione di queste molecole varia con la maturazione si possono quindi elaborare precisi indici di misurazione della maturazione della frutta. Alcune delle principali molecole su cui si concentrano le analisi fluorimetriche sono ad esempio i polifenoli (esempio tannini, antociani, flavonoli) che sono legati al metabolismo delle piante e la nota clorofilla. Si è notato che queste molecole degradano durante la maturazione e quindi la loro concentrazione rilevata tramite fluorescenza mette in evidenza l'evoluzione fisiologica del frutto analizzato. Le apparecchiature capaci di

rilevare queste emissioni di luce sono chiamate spettrofluorimetri o fluorimetri, in Figura 8 si può vedere un fluorimetro a fotodiodi utilizzato per evidenziare lo stato di salute delle piante analizzando le foglie ed il loro contenuto di clorofilla.

Sono stati elaborati diversi indici che possono essere utilizzati sia per valutare il metabolismo di una pianta che l'evoluzione fisiologica del frutto. Tra i più noti ed utilizzati figurano l'NChI (Normalized index of chlorophyll decrease) ed il NBI (Nitrogen Balance Index) sintomatici del metabolismo della pianta [12][13]. Il primo valuta il decadimento della clorofilla di tipo "a" e "b", che rispettivamente tendono ad assorbire la luce viola/rossa e blu/arancione (vedi Figura 9). Mentre l'NBI misura il rapporto clorofilla/flavonoli della pianta, che varia in base alla quantità di azoto assunte durante la sua crescita.

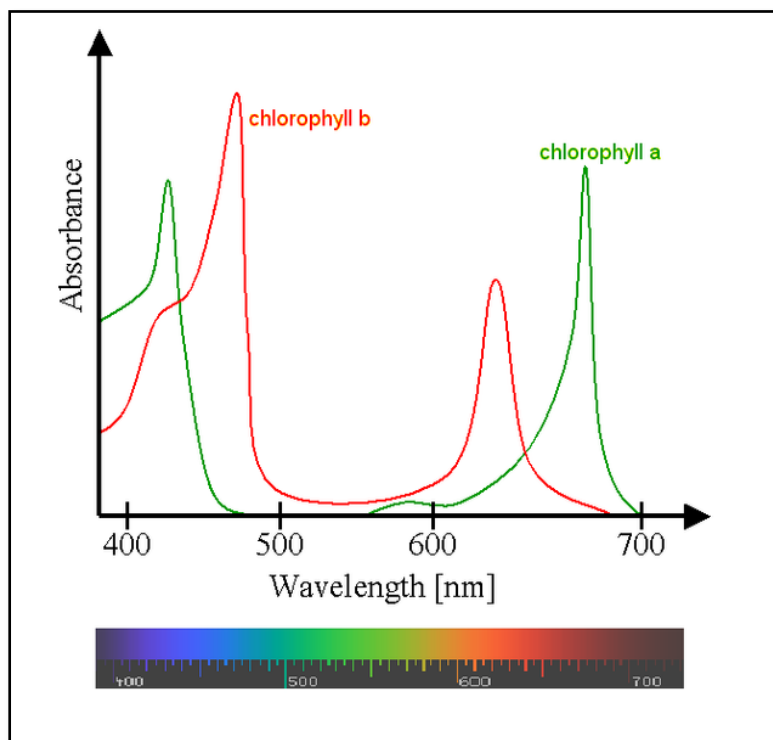


Figura 9: Picchi d'assorbimento della clorofilla "a" e "b" [14]

Spettroscopia a Raggi-X

Un'altra banda dello spettro elettromagnetico sfruttata a fini di spettroscopia applicata alla condizione dei prodotti ortofrutticoli consiste nei Raggi-X, onde elettromagnetiche caratterizzate da frequenze che vanno dai 10^{17} ai 10^{21} Hz. Nonostante la densità dei frutti influenzi l'attraversamento dei Raggi-X in modo considerevole, sono comunque sfruttati per eseguire vere e proprie radiografie e quindi per valutare le condizioni interne dei prodotti ortofrutticoli quando altre tecniche come NIR o NMR non forniscono dati interessanti. Un esempio d'applicazione è la valutazione della traslucenza dei frutti d'ananas (vedi Figura 9), collegata direttamente al livello di saccarosio e quindi alla dolcezza del frutto ed alla sua maturazione [15]. Sono state sviluppate diverse tecniche tra cui la radiografia bidimensionale, la radiografia a line-scan e la tomografia computerizzata, capaci di rilevare difetti interni dei campioni e fornire informazioni interessanti del loro sviluppo fisiologico [16]. Nonostante questi metodi siano molto efficaci, rimane difficile applicarli al settore agroalimentare ed a modelli industriali, principalmente per i costi esorbitanti delle attrezzature e la difficoltà di sviluppare software adeguati.

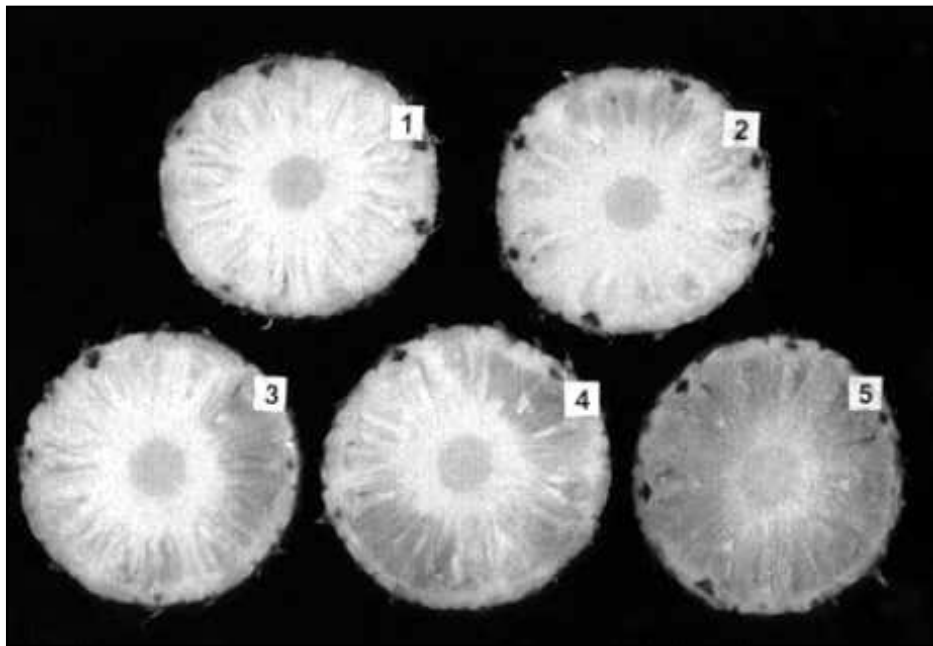


Figura 9: Valutazione della traslucenza dei frutti di ananas tramite Raggi-X [15].

Approccio Meccanico

L'ultimo tipo di approccio che andiamo ad analizzare e che approfondiremo maggiormente è quello di tipo meccanico. Le tecniche distruttive analizzate precedentemente utilizzano penetrometri e rifrattometri che presentano numerosi problemi, primi fra tutti il deterioramento del campione e la non ripetitività della misura. Negli ultimi decenni, per cercare di risolvere questi inconvenienti, è stato dedicato diverso tempo alla ricerca di nuove metodologie non-distruttive: una di queste sfrutta un approccio meccanico e include nuove tecniche capaci di sondare le proprietà meccaniche e fisiche senza danneggiare il frutto, ed elaborare nuovi indici di misurazione dei prodotti ortofrutticoli correlati direttamente al loro stato fisiologico ed alla maturazione. Sono tecniche facilmente applicabili a prodotti ortofrutticoli piuttosto regolari che si prestano bene ad essere impattati, come ad esempio mele, pesche, pere, kiwi, pomodori, mango, papaya, ed altri piccoli frutti. Questo tipo d'approccio non è esente da difetti, la maggior parte dei metodi non distruttivi capaci di misurare la consistenza della polpa dei frutti non si prestano facilmente all'uso in linea produttiva, questo è dovuto all'estrema variabilità della durezza del frutto nei diversi punti della sua superficie e al diverso stato di idratazione del frutto in conservazione [16]. Possiamo distinguere tre tipologie di tecniche meccaniche: ad impatto, a deformazione ed a vibrazione acustica.

Tecnica ad impatto

Le tecniche ad impatto sono state sviluppate per poter determinare l'elasticità del frutto, ovvero la capacità del medesimo di sostenere una deformazione e tornare allo stato iniziale dopo aver subito un'eccitazione come un impatto diretto od una pressione superficiale. Sono metodologie che permettono di determinare diverse caratteristiche dei prodotti ortofrutticoli in modo rapido ed attendibile, per poter applicare questo tipo di tecniche sono necessari sensori in grado di valutare la reazione del frutto a queste eccitazioni fisiche. Inizialmente le tecniche ad impatto furono utilizzate per ridurre il numero di ammaccature dei frutti e calcolare i contraccolpi subiti nei sistemi di raccolta. Solo successivamente sono state adattate per studiare la consistenza dei frutti. Diversi autori [17] hanno riportato che queste tecniche ad impatto possono essere utilizzate con successo per valutare la fermezza della frutta e descrivono molti modi di utilizzare sensori ad impatto: come ad esempio colpire il frutto con un elemento contenente il sensore, mettere il frutto su una cella di carico e lasciarci cadere sopra un peso oppure far direttamente cadere il frutto su una superficie su cui è posto un sensore. Grazie alla loro

applicazione è possibile elaborare indici di elasticità correlati a parametri come la forza vincolare di risposta, il tempo di contatto, l'energia assorbita. Tra i più utilizzati e versatili ci sono i sensori piezoelettrici, aventi la caratteristica particolare di deformarsi all'impatto e generare una tensione elettrica che può essere utilizzata per assegnare determinati valori di fermezza al frutto. Un macchinario industriale che sfrutta questa tecnica ad impatto è il Sinclair iQ™ *online* [18] in Figura 10, che grazie a martelletti idraulici dotati di sensori piezoelettrici riesce ad analizzare diversi campioni in un breve lasso di tempo.



Figura 10: Macchinario industriale ad impatto Sinclair iQ™ *online* [18].

Tecnica del Rimbalzo

Abbiamo visto le tecniche ad impatto, le quali mostrano che la fermezza di un frutto può essere quantificata valutando il sistema da un punto di vista fisico-meccanico, ovvero considerando l'impatto sul frutto come un urto elastico a bassa energia. Una tecnica derivata da questo principio quantifica la fermezza del frutto valutando il rimbalzo che questo ha dopo aver impattato contro una superficie [17]. Questa tecnica fu inizialmente utilizzata in ambito commerciale sui raccolti di patate per separarle dalle zolle di terra. Il principio considerava il fatto che, dopo l'urto con un cilindro rotante, patate e zolle cadessero a distanze diverse dal punto d'impatto seguendo un andamento determinato dal coefficiente di restituzione (parametro che misura l'elasticità dell'urto). Tuttavia i coefficienti di restituzione di patate e zolle di terra sono molto simili, così in seguito la separazione fu eseguita impattando l'agglomerato con una piattaforma elastica. Questo permise di assorbire l'energia delle zolle, in modo da diminuire il loro coefficiente di restituzione. Anche se la differenza finale tra i coefficienti di zolle e patate rimase molto piccola, fu sufficiente per separarli [17]. Seguendo il principio di questa tecnica del rimbalzo fu quindi costruito un sistema industriale online che permise la separazione delle olive morbide da quelle di buona qualità. [19]. Esso consiste in un nastro trasportatore che trasferisce le olive su un cilindro orizzontale ricoperto da un imbottitura. La separazione avviene in questo modo: il cilindro ruota in direzione opposta al nastro, urtando il cilindro le olive morbide rimbalzano meno e cadono più vicine al punto d'impatto rispetto a quelle di buona qualità. Con questo metodo fu reso possibile anche a separare frutti in cattive condizioni da quelli di buona qualità alla velocità di 39-90 frutti al secondo [20].

Tecnica a deformazione

La tecnica a deformazione rientra nella categoria dei metodi non distruttivi solamente se le forze in gioco sono abbastanza piccole da non danneggiare il prodotto agricolo. Nel 1994 fu sviluppato [21] un dispositivo capace di misurare fermezza e consistenza della polpa applicando una pressione al frutto. Un pistone aveva il compito di deformare la superficie del frutto all'interno di un *range* d'elasticità. Un metodo simile fu utilizzato nel 1996 [22] per misurare la fermezza dei kiwi, mentre negli anni successivi fu studiato un metodo più sofisticato per la misurazione non distruttiva della fermezza della frutta: il Laser Air-Puff Detector [23] (vedi Figura 11).

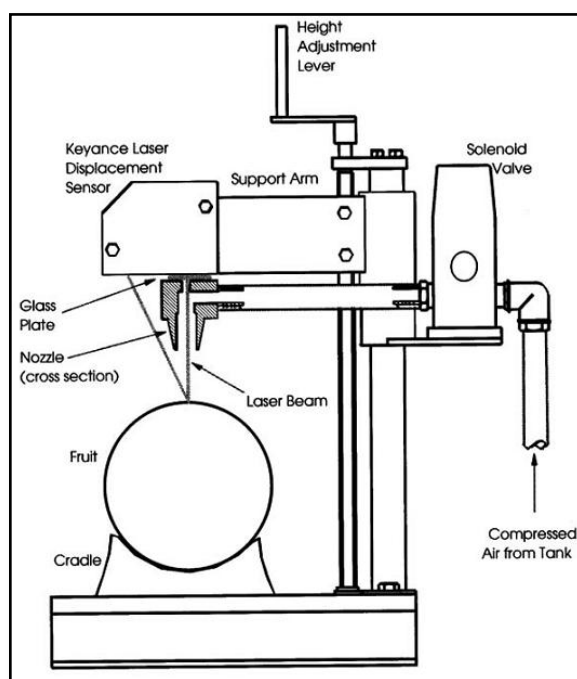


Figura 11: Laser Air-Puff Detector [23].

Tramite questo metodo riuscirono a determinare le caratteristiche di diverse varietà di pesca calcolando l'estensione della superficie deformata da un flusso d'aria variabile. Notarono che la deformazione sulla superficie misurata tramite sensore laser aumentava al diminuire della fermezza del frutto e quindi al suo stato progressivo di maturazione. Osservarono anche una buona correlazione con le misurazioni effettuate tramite penetrometro, in quanto la forza applicata dal puntello sulla superficie del frutto è associabile ad una pressione esercitata dall'aria soffiata. Un altro metodo a deformazione fu utilizzato per studiare le proprietà meccaniche dei kiwi [24]: il campione viene vincolato tra una superficie rigida ed un vibratore elettrodinamico per essere poi sottoposto a vibrazioni sinusoidali multiple. Le proprietà fisiche del frutto vengono determinate misurando lo spostamento e la forza generati dal vibratore su di esso. Questa tecnica a deformazione rispetto alla precedente ha il pregio di evitare influenze locali che possono portare ad errori di misurazione. Ad ogni modo le tecniche a deformazione descritte non sono considerate le migliori in circolazione, in quanto, nonostante tutte le precauzioni, possono comunque danneggiare il campione e riescono solamente a valutare la fermezza superficiale del prodotto ortofrutticolo. Per questi motivi si è rivolta l'attenzione verso tecniche meccaniche che sfruttino un tipo d'approccio a vibrazione acustica.

Tecnica a vibrazione acustica

Il principio su cui si fonda la tecnica a vibrazione acustica deriva dal metodo tradizionale con cui si valutano maturazione ed eventuali difetti di frutti come meloni o cocomeri, ovvero si battono con le dita per ascoltare il suono che emettono. Il suono è determinato da particolari caratteristiche come l'intensità che risulta principalmente legata alla forza applicata al frutto, il timbro che è legato alla frequenza f dell'onda sonora che attraversa il campione considerato e la nitidezza della risonanza che è determinata fisicamente dal fattore di qualità Q [25]. I prodotti agricoli, specialmente la frutta, diventano più morbidi con l'avanzare del processo di maturazione, perciò la durezza della frutta riflette in modo fedele il grado di maturazione e può essere utilizzato per effettuare misurazioni. La durezza può essere quindi valutata esaminando la frequenza del suono emesso da un frutto dopo essere stato colpito. A parità di massa noteremo che più sarà duro e denso e più il suono sarà ad una frequenza maggiore. La tecnica tradizionale risulta essere troppo dipendente dall'operatore e quindi molto soggettiva, il modo in cui colpisce il frutto e le sue capacità di valutazione sono fattori determinanti. Si è cercato quindi di adottare questo metodo ed applicarlo ad un macchinario che fosse in grado di eccitare in maniera ripetibile il frutto senza danneggiarlo e di misurarne le proprietà dell'onda sonora che lo attraversa. Se consideriamo il campione di frutta di massa m come composto da due masse di massa $m/2$ connesse da una molla di costante elastica k come mostrato in Figura 12, per la fisica meccanica possiamo ricavare la costante elastica del modello: $k = \pi^2 f^2 m$.

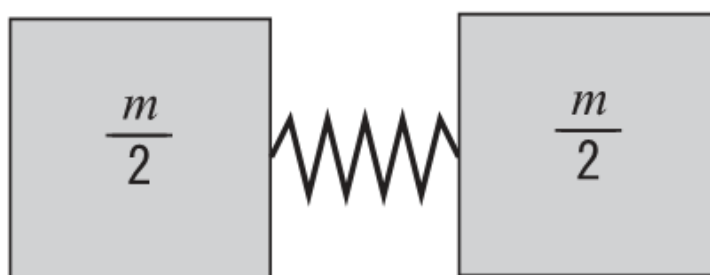


Figura 12: Modello Massa-Molla di un corpo elastico di massa m [25].

Questo modello fu utilizzato nel 1968 [26] per elaborare un primo indice di misurazione della durezza dei frutti che consisteva nell'associare la massa del campione di frutta al quadrato della sua seconda frequenza di risonanza f^2 . Riuscì a verificarne la validità applicando la risonanza acustica su diverse varietà di mele. In seguito furono formulati

altri indici analitici prendendo come esempio altri modelli elastici e variando alcuni parametri. In seguito si iniziò a considerare il modulo di elasticità longitudinale (modulo di Young E) che esprime il rapporto tra forza superficiale esercitata sulla superficie e deformazione di un corpo elastico. La velocità di propagazione dell'onda sonora v si può ricavare dalla relazione del modulo di Young con la densità del frutto ρ che sono relazionati in questo modo: $E = \rho v^2$. È considerata un buon indice di durezza ed integrità del campione, infatti ricordando che le onde sonore si propagano in un mezzo con velocità proporzionale alla sua densità, è ragionevole associare v alla durezza del frutto. Di conseguenza più un frutto sarà maturo più tempo impiegherà l'onda sonora ad attraversarlo. La semplicità del principio su cui si fondano le tecniche a vibrazione acustica ne ha favorito lo sviluppo di diverse varianti applicate all'analisi reologica di prodotti ortofrutticoli. Tutte quante però hanno in comune la presenza di attuatori che hanno il compito di eccitare il frutto e di sensori che effettuano il *sensing* della risposta.

Attuazione nelle tecniche a vibrazione acustica

L'eccitazione del frutto ed il conseguente trasferimento dell'onda sonora al suo interno può essere eseguita in modi diversi [25]. Si può distinguere una prima metodologia meccanica ad impatto libero che utilizza un semplice percussore capace di fornire istantaneamente una forza al frutto senza danneggiarlo e di causare un'onda sonora libera di propagarsi al suo interno. Questa metodologia ha il pregio di essere semplice e facilmente realizzabile, inoltre la forza d'eccitazione permette di operare in un'ampia banda di frequenze, anche se questo può diventare un limite dato che l'energia dell'urto si disperde più facilmente. Un altro limite è la difficile ripetibilità: l'impatto non dovrebbe variare quando si effettuano misurazioni multiple, ma non è semplice ricreare una situazione identica. Una seconda metodologia sfrutta materiali piezoelettrici o più complessi *shaker* elettrodinamici capaci di indurre forze variabili che eccitano continuamente il campione durante la fase di misurazione, di conseguenza il frutto è soggetto a vibrazioni forzate che vengono monitorate dal sistema ed elaborate per ottenere una vera e propria funzione di trasferimento del campione. I vantaggi di questa metodologia sono la facile ripetibilità delle misure e la notevole bontà dei dati raccolti, in quanto l'eccitazione ad onde sinusoidali permette di lavorare in una banda più ristretta. Però rispetto a metodi meccanici richiede apparecchiature più sofisticate e costose che necessitano anche di particolari procedure di calibrazione e manutenzione.

Sensoristica nelle tecniche a vibrazione acustica

Per poter affrontare una campagna di misurazione utilizzando tecniche a vibrazione acustica è necessario disporre di sensori con determinate prestazioni: precisione, velocità ed immunità ai disturbi. Possiamo fare una prima distinzione considerando i sensori a contatto come accelerometri e materiali piezoelettrici. Questi sono posizionati direttamente sulla superficie del prodotto ortofrutticolo e permettono di ottenere informazioni in modo semplice ed immediato senza dover utilizzare particolari strumentazioni aggiuntive. In certi casi il loro utilizzo può diventare sconsigliato a causa di possibili interferenze sulla misura causate dal sensore stesso, per evitare errori di misura il sensore deve avere una massa trascurabile rispetto al campione per non perturbare il modello del sistema e la risposta all'eccitazione, inoltre deve essere posizionato sul frutto nel modo giusto e sempre nella stessa posizione per fornire una misura con un alto grado di ripetibilità. Esistono anche tipi di sensori non a contatto (come laser e microfoni) che annullano il problema dell'influenza sulla misura e agevolano la ripetibilità della tecnica acustica.

Esempi applicativi di tecniche a vibrazione acustica

In Figura 13 è possibile vedere un semplice sistema che sfrutta un pendolo come attuatore meccanico, incaricato di eccitare il frutto. L'onda sonora si propaga al suo interno e viene captata da un sensore a contatto di tipo piezoelettrico il quale la traduce in un segnale elettrico, che sarà elaborato dal computer tramite algoritmi a trasformata di Fourier FFT.

In Figura 14 si nota un sistema più complesso sfruttato per valutare l'indice di elasticità dei meloni tramite uno shaker elettrodinamico comandato da remoto. La misura dello spettro di vibrazione, che verrà poi correlato alla massa del campione, viene effettuata grazie a sensori multipli, tra cui un accelerometro ed un sensore laser a distanza LDV.

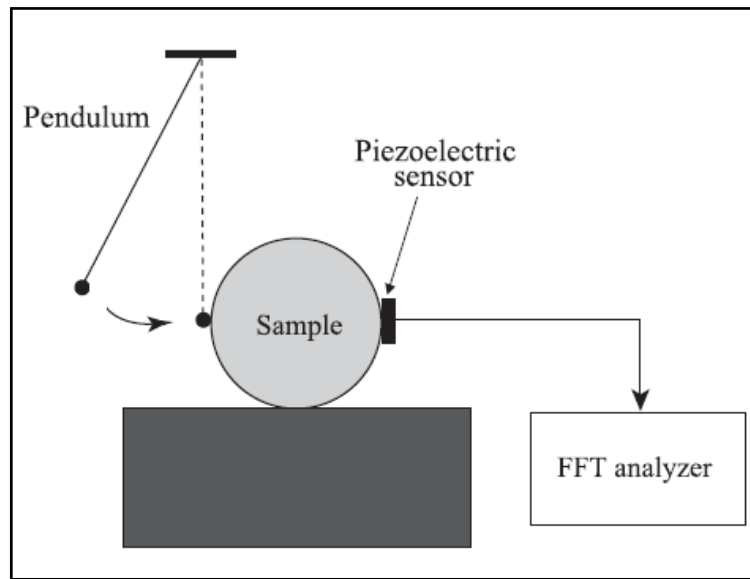


Figura 13: Esempio di sistema a vibrazione acustica con analisi FFT [25].

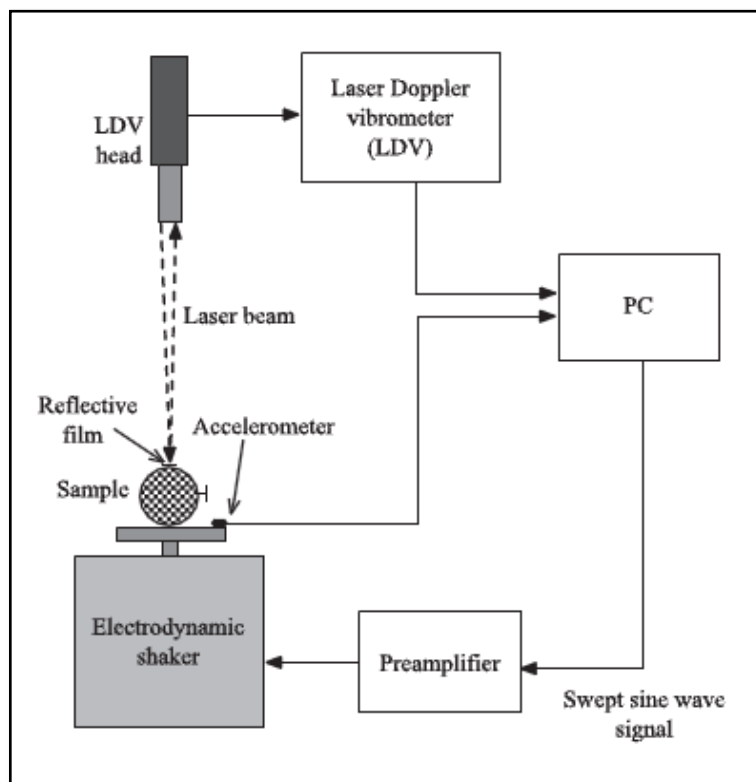


Figura 14: Sistema di misurazione non distruttiva a vibrazione che utilizza uno shaker elettrodinamico ed un sensore a Laser Doppler Vibrometer (LDV) [25].

Progetto del sistema elettronico

Il sistema elettronico progettato nel seguente elaborato, riguarda la creazione di un'architettura di sistema che per sua semplicità e natura modulare risulta flessibile e versatile. Il sistema offre la possibilità di effettuare una valutazione reologica di singoli oggetti sfruttando molte delle tecniche illustrate in precedenza. Questo è possibile perché le macro operazioni da compiere possono essere effettuate in vari modi grazie alla varietà di soluzioni elettroniche implementabili: applicazione di sollecitazioni, procedura di lettura dei segnali tramite sensori, elaborazione dati via microcontrollore e studio delle informazioni ottenute.

In particolare si è scelto come ambito applicativo l'utilizzo di tecniche di analisi acustica implementate mediante l'uso di trasduttori piezoelettrici, volte allo studio delle caratteristiche interne di campioni di frutta variegata.

I dispositivi piezoelettrici hanno caratteristiche peculiari molto interessanti, che li rendono adatti ad applicazioni elettroniche di precisione su piccoli segnali. Sono realizzati tramite materiali ceramici polarizzati a singoli o più strati che reagiscono a sollecitazione meccanica accumulando carica elettrica e generando quindi ai loro capi una differenza di potenziale. In modo speculare se vengono stimolati elettricamente sono soggetti a deformazione o a variazioni di volume. I dispositivi multistrato sono dotati di dielettrico, questa caratteristica li rende simili nel comportamento a dei condensatori ed adatti ad applicazioni di sensoristica ed attuazione. In Figura 15 si possono osservare due piezoelettrici in modalità *cantilever* che svolgono rispettivamente il ruolo di sensore ed attuatore.

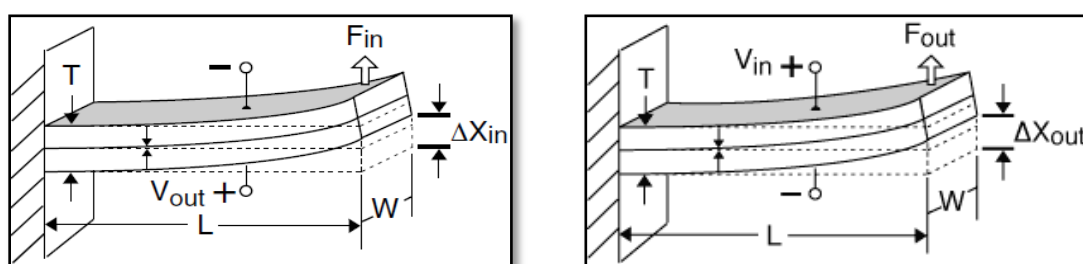


Figura 15: Trasduttori piezoelettrici in modalità *cantilever*, sensore a sinistra ed attuatore a destra [27].

E' stato sviluppato un sistema automatico gestito da una scheda elettronica, il quale studia le proprietà reologiche di singoli frutti mediante analisi piezo-acustica in *real-time*. Gli studi effettuati precedentemente utilizzando ambienti di sviluppo software vengono applicati ad un prototipo elettronico che sfrutta l'interfacciamento di sensori ed attuatori piezoelettrici a microcontrollori dedicati, capaci di acquisire ed elaborare segnali e gestire le diverse parti del processo di analisi. In Figura 16 è mostrato il banco di simulazione preliminare interfacciato ad un PC che elabora i segnali provenienti dai trasduttori mediante un adattatore in ambiente LabVIEW della National Instruments. Si nota un supporto meccanico dotato di un attuttore ed un sensore entrambi piezoelettrici e strumentazioni di testing tra cui un amplificatore di potenza per il pilotaggio dell'attuatore.

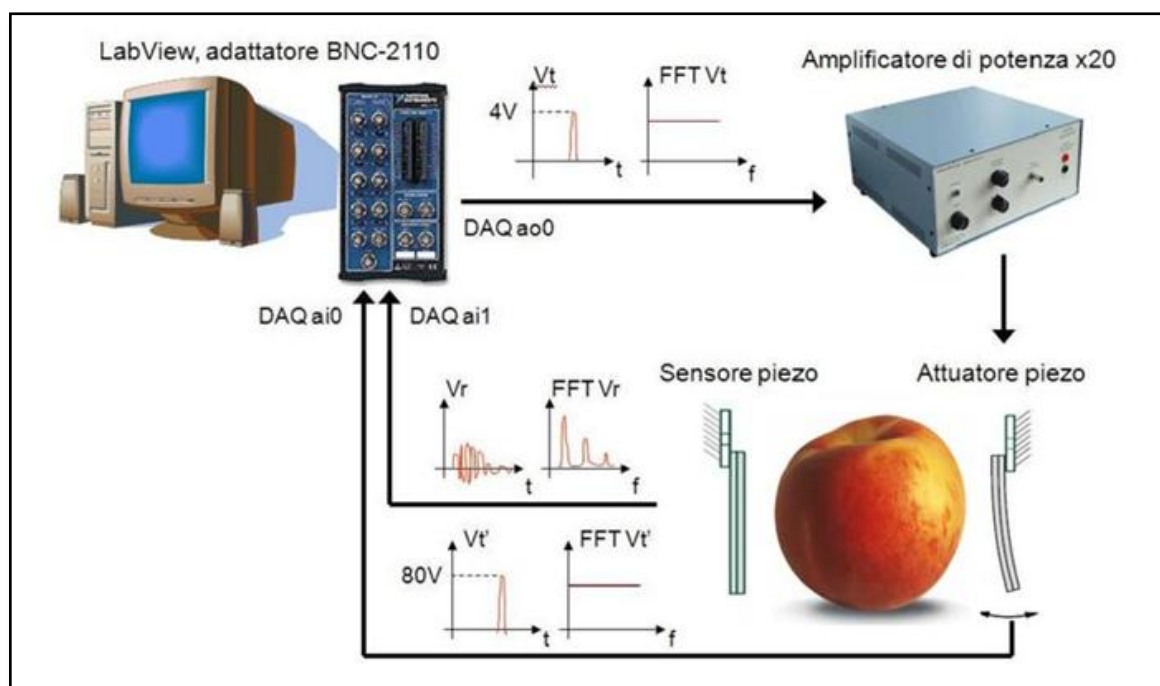


Figura 16: Banco di prova per lo sviluppo del sistema e campagna di misurazione preliminare.

Implementazione del sistema su scheda elettronica autonoma

Lo sviluppo del prototipo ha richiesto particolari accorgimenti e soluzioni dedicate per ogni complessa funzione da svolgere. Si è deciso di suddividere il progetto in più moduli indipendenti e facilmente interfacciabili tra loro. La piattaforma elettronica per l'analisi reologica di campioni di frutta è stata quindi suddivisa in più schede assemblabili, ognuna responsabile di un compito preciso.

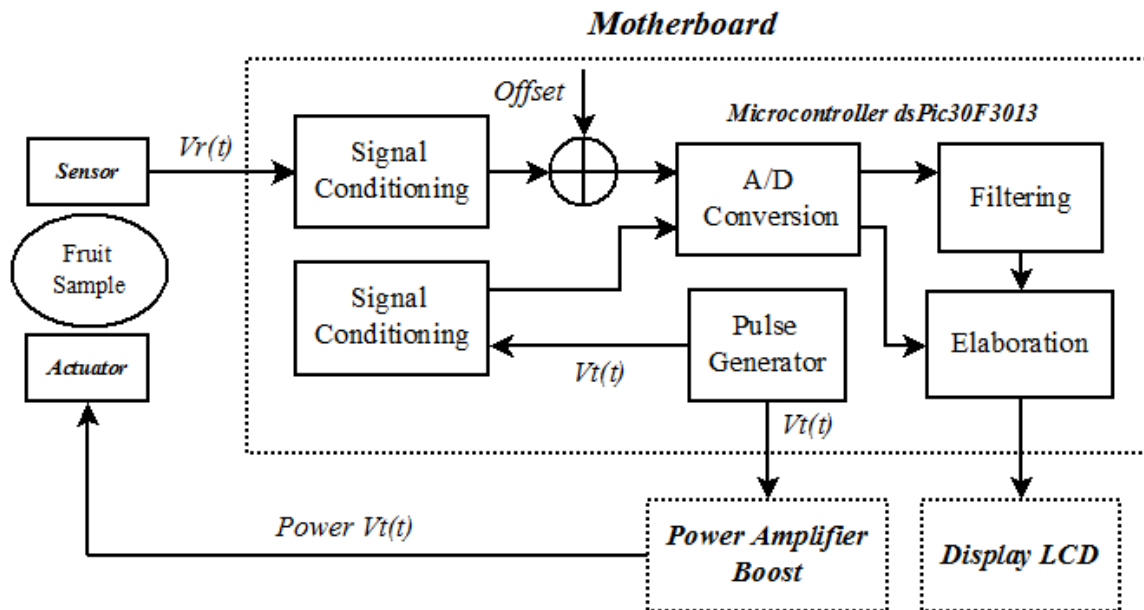


Figura 17: Schema a blocchi del sistema per lo sviluppo su scheda elettronica.

Dallo schema a blocchi in Figura 17 si può notare la complessità del sistema e discriminare i macroblocchi che lo compongono. Analizzeremo i macroblocchi singolarmente per descrivere le precise funzionalità che dovranno svolgere in maniera autonoma:

- Scheda Madre
- Scheda Display per la visualizzazione dati
- Scheda di potenza per l'attuazione

Scheda Madre

Il progetto è iniziato con la creazione di una scheda madre principale dotata di uno speciale microcontrollore per segnali analogici, la quale si comporta da *Master*, ovvero ha il compito di comandare le schede secondarie cosiddette *Slaves*, ma anche di adattare, acquisire ed elaborare i segnali provenienti dal sensore e dall'attuatore. Si può visionare lo schematico completo della scheda madre in Figura 18.

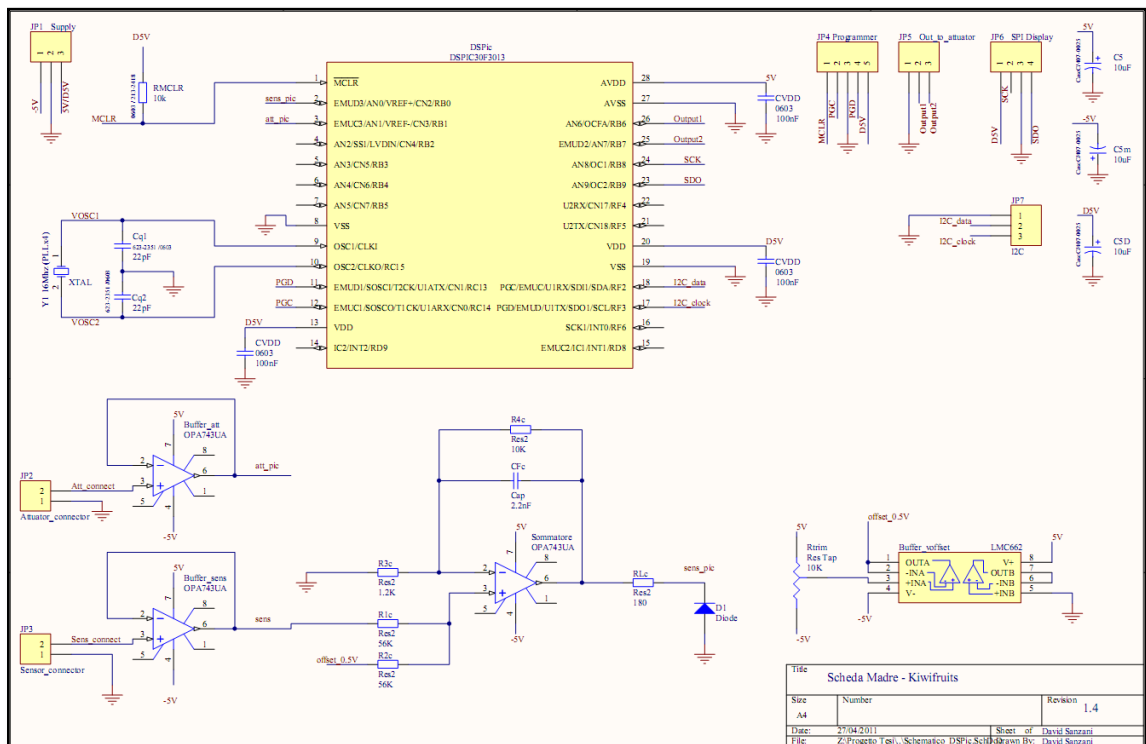


Figura 18: Schematico della scheda madre disegnato con CAD Altium Designer.

Condizionamento dei segnali

La prima fase del progetto è stata quella di costruire un'adeguata circuiteria elettronica capace di acquisire ed elaborare segnali di tipo analogico provenienti dal processo d'eccitazione piezoelettrica sugli oggetti analizzati. Come si è visto in Figura 16 e nello schema a blocchi di Figura 17, la tecnica acustica implementata prevede che il campione

sia posizionato a contatto tra un attuatore ed un sensore piezoelettrico. I segnali tipici sono i seguenti: un primo segnale d'eccitazione dell'attuatore piezoelettrico $Vt(t)$, che eccita il frutto mediante la generazione di impulsi sonori, e dopo un certo ritardo Δt una risposta di propagazione libera $Vr(t)$ avvenuta nel frutto. In Figura 19 si può notare la natura dei segnali appena citati, come suggerito nell'articolo redatto da Muramatsu [28].

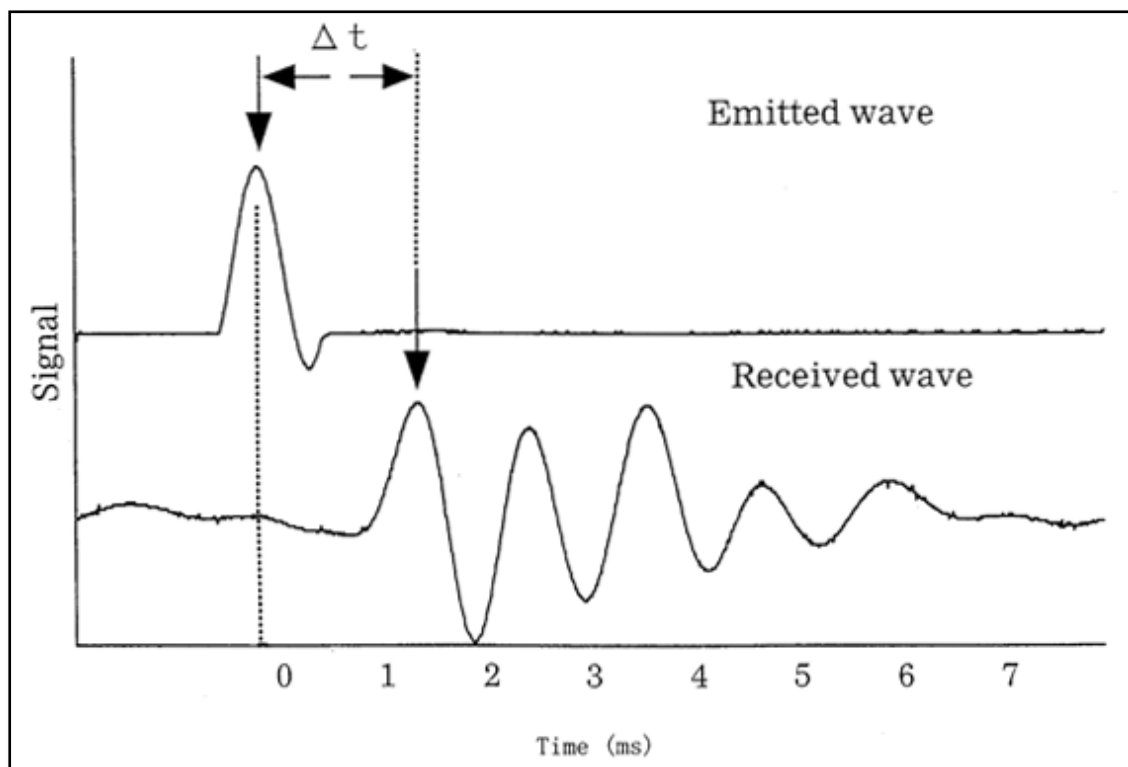


Figura 19: Modello propagativo, segnali $Vt(t)$, $Vr(t)$ e ritardo di propagazione Δt [28].

Dallo schematico di Figura 18 si può notare che l'acquisizione dei segnali è resa possibile utilizzando stadi di pre-amplificazione ed adattamento formati da due amplificatori operazionali in configurazione inseguitore in grado di disaccoppiare i segnali generati dai trasduttori ed un terzo amplificatore operazionale in configurazione sommatore non-invertente in grado di amplificare il segnale. Le forme d'onda tipiche in ingresso sono visibili in Figura 20, in particolare la risposta $Vr(t)$ può variare tra i ± 0.4 V, quindi per aumentare il range dinamico del segnale vengono sommate tramite il sommatore non invertente ad un generatore di *offset* che fornisce + 0.5 V necessari a traslare la forma d'onda $Vr(t)$ su valori positivi. Il segnale viene poi filtrato grazie ad un filtro passa basso

RC con frequenza di taglio f_t di circa 8 KHz ed amplificato per portare i segnali in un range di tensione compreso tra 0 V e l'alimentazione di 5 V, mantenendo un margine di sicurezza per evitare la saturazione. Per verificare la corretta acquisizione dei segnali e tarare l'elettronica di pre-amplificazione si è utilizzato un oscilloscopio Tektronix. I risultati sono stati più che soddisfacenti: posizionando due sonde per segnali in prossimità dell'ingresso e all'uscita dello stadio di condizionamento sono stati ottenuti i segnali in Figura 20, che corrispondono ad un esempio di segnale di risposta $V_r(t)$ ed al corrispettivo segnale condizionato $V_r'(t)$. Sovrapponendoli si notano le diverse scale utilizzate nell'asse delle ordinate che evidenziano l'avvenuta amplificazione della tensione del segnale e la fedeltà della sua replica.

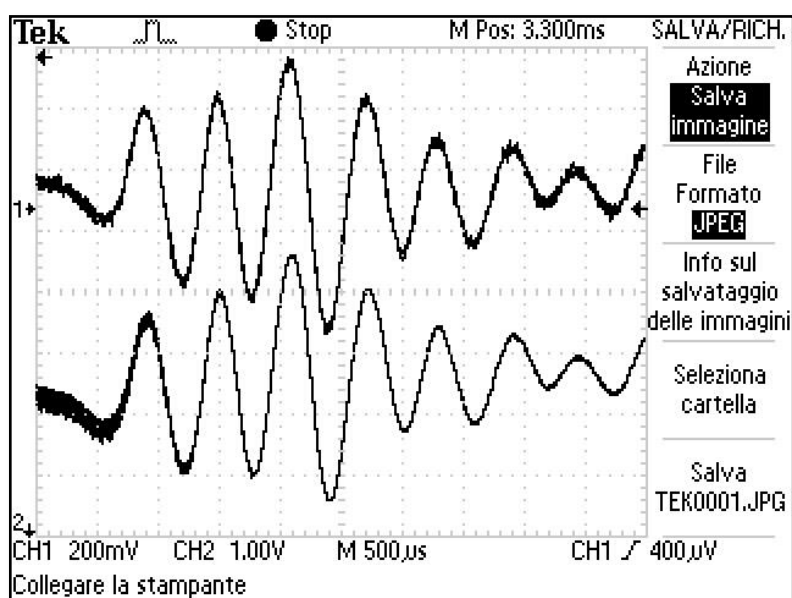


Figura 20: Visualizzazione dei segnali $V_r(t)$ e $V_r'(t)$ ai capi dello stadio di condizionamento.

Scelta del Microcontrollore

L'acquisizione, il filtraggio e l'elaborazione di segnali analogici sono processi molto costosi in termini di tempi di calcolo e risorse di memoria. Particolare enfasi è stata data alla ricerca di un microcontrollore capace di soddisfare le nostre esigenze. La scelta è stata ponderata tenendo conto delle necessità di dover convertire segnali analogici in segnali digitali in tempi molto brevi e di disporre di un'elevata potenza di calcolo per filtrarli dai disturbi ed elaborarli. Per questi motivi è stato scelto un microcontrollore della

famiglia dei dsPIC (Digital Signal Processors), capace di eseguire calcoli complessi e gestire diverse tipologie di periferiche, come ad esempio la circuiteria di attuazione piezoelettrica ed un modulo Display per la visualizzazione dei dati in modalità Master/Slave. I microcontrollori dsPIC a differenza dei comuni PIC in circolazione hanno la peculiarità di poter essere programmati per gestire un discreto numero di dati e di riuscire a sopportare l'implementazione di complessi algoritmi di filtraggio come filtri digitali FIR e IIR.

La scelta del modello è stata effettuata considerando diversi parametri: Un primo elemento considerato è stato il voltaggio dell'alimentazione, per permettere il corretto funzionamento degli amplificatori operazionali dato che la scheda è alimentata con tensione bipolare a ± 5 V, si è optato per una VDD di 5 V in modo d'evitare la necessità di alimentazioni aggiuntive. Un secondo elemento è stato quello di cercare un controllore che avesse un numero adeguato di PIN senza aumentare eccessivamente l'ingombro e la capacità di comunicare con altri microcontrollori utilizzando protocolli di comunicazione seriale, questo per poter implementare un'architettura di sistema a moduli che potesse includere nuove funzionalità aggiuntive. Per le esigenze di elaborazione, filtraggio dei segnali e velocità di esecuzione si è optato per un'architettura ISA a 16 bit capace, nelle implementazioni selezionate, di operare a frequenze di oscillazione di decine di MHz e di raggiungere potenze di calcolo di 30 MIPS (Millions Instructions Per Second).

Dovendo campionare segnali analogici multipli si è cercato un modello dotato di un convertitore Analogico/Digitale multicanale che avesse una risoluzione adeguata alle nostre esigenze, capace di campionare segnali a frequenze $f_C > 50$ KHz e cambiare istantaneamente canale: quindi almeno 12 bit di risoluzione ed un numero di canali sovradimensionato per un loro possibile utilizzo in parallelo. L'ADC in questione dev'essere adeguato ad operare con tempistiche di conversione T_{Con} dell'ordine dei 10 μ s, che dovranno essere molto minori del tempo di campionamento massimo richiesto dall'applicazione per il quale risulta adeguato alla maggior parte delle applicazioni un $T_{Cmax} = 20 \mu$ s ($1/f_{Cmin}$). Ultimo parametro di progetto, ma forse il più importante è la quantità di memoria RAM disponibile: il salvataggio delle forme d'onda analogiche per poterne effettuare un'elaborazione digitale richiede relativamente molta memoria, per cui è stato selezionato un dsPIC avente un minimo di 2 Kbytes di RAM che riuscisse quindi a salvare il numero necessario di campioni in *buffer* di memoria dedicati, se si considerano campioni di almeno 2 byte e si vuole dedicare almeno il 50% della memoria al salvataggio delle forme d'onda è possibile creare vettori di memoria capaci di contenere almeno 500 campioni.

Dopo aver visionato i dsPIC disponibili in commercio sul sito della Microchip [29] si sono valutati diversi modelli che avessero caratteristiche compatibili alle nostre esigenze di progetto. In particolare sono stati comparati alcuni microcontrollori della famiglia 30F, riportati nella Tabella 2. La scelta è caduta sul modello dsPIC30F3013 (Figura 21) che rispetta tutti i nostri requisiti e che oltre ad essere economico presenta l'ulteriore vantaggio di esistere sia in versione SPDIP montabile su schede millefori, che in versione SOIC montabile su schede PCBs (Printed Circuit Boards).

Product Family	Price (\$)	ISA (bit)	Speed (MIPS)	RAM (Byte)	VDD (Volt)	Pins	Analog Peripherals (ADC Channels)
dsPIC30F1010	2.82	16	30	256	3 - 5.5	28	6 x 10-bit @ 2000 (ksps)
dsPIC30F2010	2.43	16	30	512	2.5 - 5.5	28	6 x 10-bit @ 1000 (ksps)
dsPIC30F2011	2.23	16	30	1024	2.5 - 5.5	18	8 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F2012	2.32	16	30	1024	2.5 - 5.5	28	10 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F2020	3.62	16	30	512	3 - 5.5	28	8 x 10-bit @ 2000 (ksps)
dsPIC30F2023	4.02	16	30	512	3 - 5.5	44	12 x 10-bit @ 2000 (ksps)
dsPIC30F3010	3.02	16	30	1024	2.5 - 5.5	28	6 x 10-bit @ 1000 (ksps)
dsPIC30F3011	3.32	16	30	1024	2.5 - 5.5	40	9 x 10-bit @ 1000 (ksps)
dsPIC30F3012	2.68	16	30	2048	2.5 - 5.5	18	8 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F3013	2.77	16	30	2048	2.5 - 5.5	28	10 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F3014	3.24	16	30	2048	2.5 - 5.5	40	13 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F4011	4.02	16	30	2048	2.5 - 5.5	40	9 x 10-bit @ 1000 (ksps)
dsPIC30F4012	3.71	16	30	2048	2.5 - 5.5	28	6 x 10-bit @ 1000 (ksps)
dsPIC30F4013	3.91	16	30	2048	2.5 - 5.5	40	13 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F5011	4.96	16	30	4096	2.5 - 5.5	64	16 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F5013	5.47	16	30	4096	2.5 - 5.5	80	16 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F5015	5.08	16	30	2048	2.5 - 5.5	64	16 x 10-bit @ 1000 (ksps)
dsPIC30F5016	5.59	16	30	2048	2.5 - 5.5	80	16 x 10-bit @ 1000 (ksps)
dsPIC30F6011A	6.89	16	30	6144	2.5 - 5.5	64	16 x 12-bit @ 200 (ksps)
dsPIC30F6013A	7.14	16	30	6144	2.5 - 5.5	80	16 x 12-bit @ 200 (ksps)

Tabella 2: Parametri e caratteristiche della famiglia di controllori dsPIC30F della Microchip [29].

Programmazione del microcontrollore

Il dsPIC30F3013, dopo esser stato montato su scheda, è stato programmato via software grazie alla piattaforma di sviluppo integrata MPLAB IDE e compilatore MPLAB-C30 forniti gratuitamente dal sito ufficiale Microchip [29], che permettono di creare progetti complessi al fine di impostare diversi settaggi relativi alle proprie esigenze, comandare il controllore e fare simulazioni specifiche.

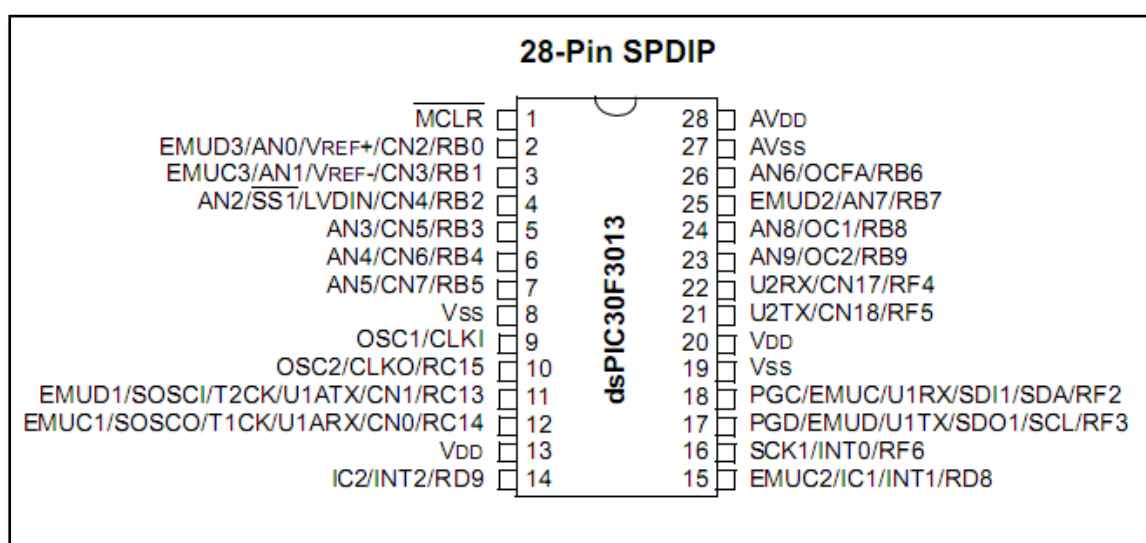


Figura 21: Immagine da datasheet del dsPIC30F3013 della Microchip, versione SPDIP [29].

I linguaggi di programmazione supportati sono il *C* e l'*Assembly*, ma per le nostre esigenze sono stati utilizzati entrambi. In Figura 22 si può osservare la struttura del progetto sviluppato su MPLAB IDE. Le istruzioni e le funzioni che il microcontrollore deve eseguire passo dopo passo vengono programmate su determinati file sorgenti e file *header*, che possono contenere anche centinaia di linee di codice. Segue una fase di compilazione che traduce i sorgenti in un linguaggio macchina leggibile dal microcontrollore. Se la compilazione ha successo e se non ci sono errori di programmazione, le istruzioni possono essere caricate sul microcontrollore: per fare questo è necessario un *Programmatore/Debugger* hardware che è possibile interfacciare col computer su cui è stata installata la piattaforma di sviluppo software. Nello specifico è stato utilizzato il PICkit 3 della Microchip che si può osservare in Figura 23.

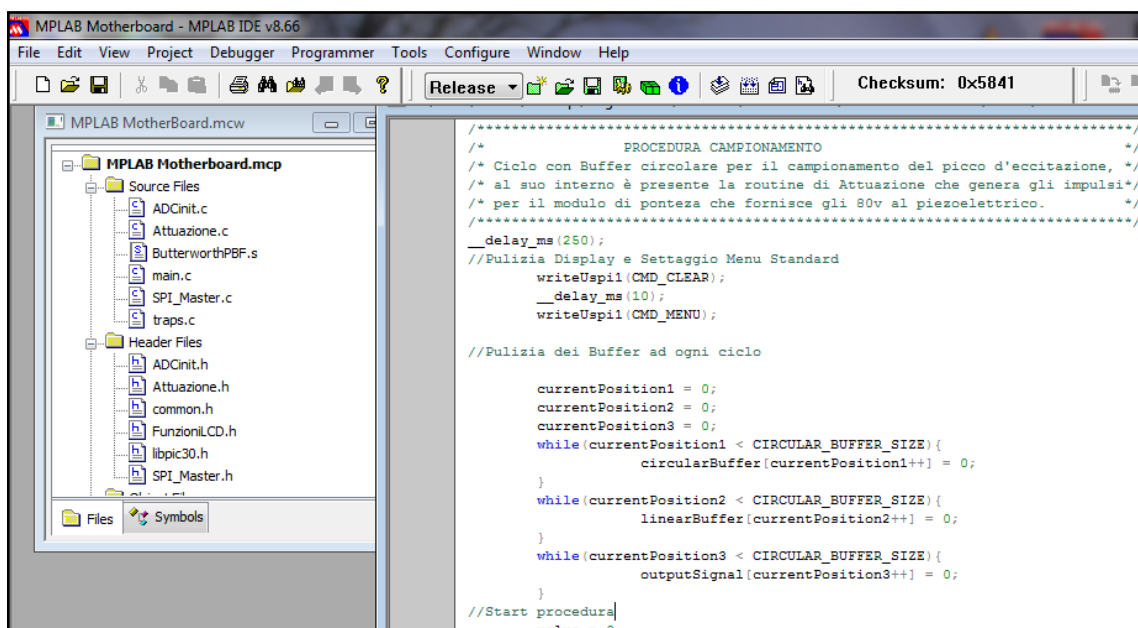


Figura 22: Piattaforma di sviluppo MPLAB, programmazione del dsPIC30F3013 in C e Assembly.

Un ulteriore supporto alla creazione del progetto ed alla programmazione fornito da MPLAB e dal PICkit3 è la modalità *debug*, che permette all'utente di verificare gli effetti delle istruzioni di codice eseguite in tempo reale sul controllore, di estrapolare dati da variabili e da segmenti di memoria. Grazie a questa modalità i dati possono essere elaborati in un secondo momento tramite software, permettendo di graficare i dati e visualizzare le forme d'onda acquisite nel processo di misurazione. Una volta impostata ed interfacciata la piattaforma di sviluppo al nostro microcontrollore si è passati alla strutturazione ed al *testing* del programma. La fase di programmazione ed ottimizzazione ha portato alla realizzazione di diversi file sorgenti per un ammontare complessivo di circa un migliaio di linee di codice. La lettura e comprensione di tutti i sorgenti di programma in codice *C* ed *Assembly* non è immediata e potrebbe risultare non particolarmente significativa ai fini della presentazione dell'attività in alcune sue parti, per cui in seguito si illustreranno in linea di principio le principali istruzioni e funzionalità che sono state implementate a livello *firmware* sul microcontrollore dsPIC30F3013 per implementare la tecnica a vibrazione acustica voluta.



Figura 23: PICkit 3 In-Circuit Debugger/Programmer della Microchip [29], dimensioni reali.

Il dsPIC30F3013 deve svolgere innumerevoli compiti, per cui anche le impostazioni devono essere molteplici e più che specifiche, infatti nel programma *main* è necessario dedicare diverse linee di codice all'inizializzazione di porte e registri interni: PINs di input/output, disabilitazione delle interruzioni, registri di configurazione del protocollo SPI, dei canali analogici dell'ADC e delle tensioni di riferimento, in particolare la massa del sistema. Impostare correttamente l'ADC risulta fondamentale per poter campionare i segnali in modo corretto. Consultando i *datasheet* e ricordando le specifiche si sono impostati i registri dell'ADC considerando un clock interno massimo dato dai 16 MHz del cristallo moltiplicato per 4 dal PLL (64 MHz). Il periodo del clock interno del microcontrollore risulta $T_{CY} = 1 / (64M / 4) = 62.5 \text{ ns}$, che senza moltiplicatore risulterebbe comunque un valore accettabile di 250 ns, da questo si ricava il tempo d'istruzione il cui valore limite è fornito dal *datasheet* ed è $T_{ADmin} = 667 \text{ ns}$, quindi settando il fattore moltiplicatore del registro ADCON3 (ADCS bits 5-0) a 21 si è ottenuto un tempo d'istruzione effettivo $T_{AD} = (T_{CY} / 2) * (21 + 1) = 687.5 \text{ ns}$. La conoscenza di questi valori ci indica se siamo effettivamente all'interno delle specifiche: ricordando un tempo di conversione massimo $T_{Cmax} = 20 \mu\text{s}$ ($1/f_{Cmin}$) possiamo calcolare se quello reale del microcontrollore è minore valutando tempistiche di acquisizione e conversione: $T_C = T_{Acq} + T_{Con} = 15 T_{AD} = 10.3 \mu\text{s}$. La routine di campionamento del programma nel caso peggiore è effettuata in 23 istruzioni macchina che in media vengono eseguite in un tempo di clock T_{CY} , quindi si hanno tempistiche $T_{Ctot} = T_C + 23 T_{CY} = 10.3 \mu\text{s} + 1.44 \mu\text{s} = 11.74 \mu\text{s}$, che permettono di stimare quanto tempo passa tra una lettura dell'ADC e la seguente. La frequenza di campionamento reale che rispecchia il numero di campioni letti al secondo è quindi $f_C = 1 / T_{Ctot} = 85.18 \text{ KHz}$, maggiore dei 50 KHz di specifica.

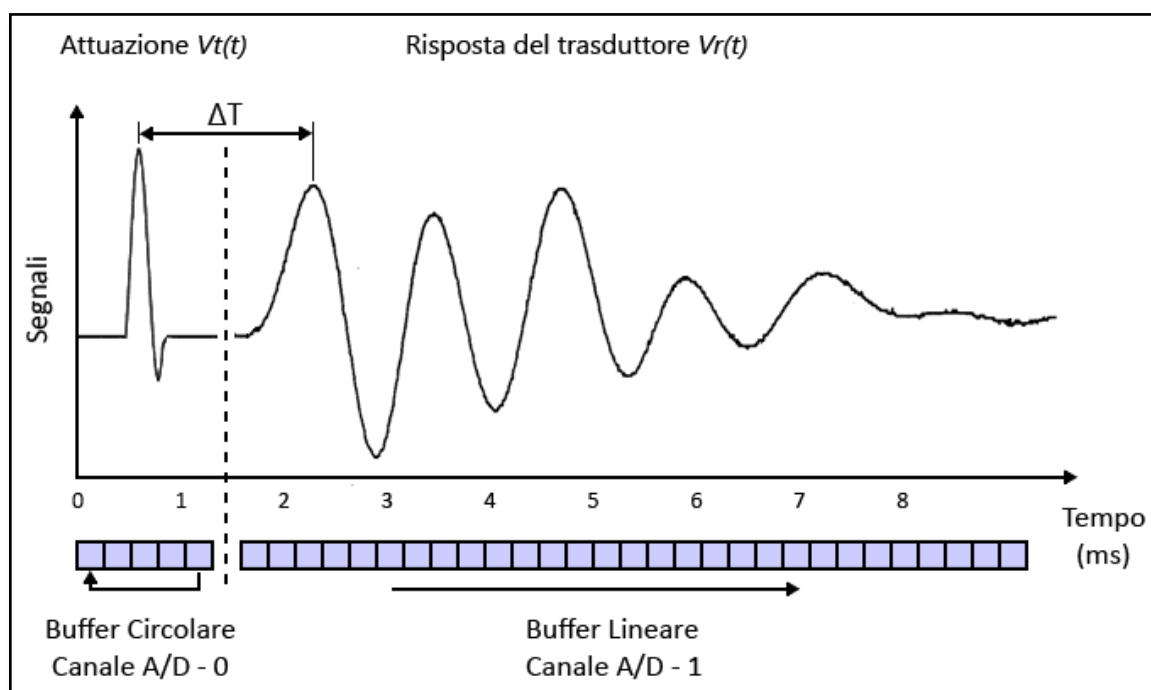


Figura 24: Schema concettuale del programma d'acquisizione eseguito dal dsPIC30F3013, ispirato al metodo Muramatsu [28], utilizzo di buffer circolare e lineare per il campionamento di $V_t(t)$ e $V_r(t)$.

Il nucleo vero e proprio del programma è contenuto all'interno di un ciclo `while(1){ }`, che consiste in una procedura ciclica che il controllore deve ripetere all'infinito finché l'operatore non decida altrimenti. In Figura 24 è riportato lo schema concettuale della procedura di acquisizione delle forme d'onda. In generale, nelle applicazioni di riferimento, il microcontrollore genera una serie di segnali di attuazione. Nel caso specifico questo avviene controllando un circuito di potenza responsabile del pilotaggio dell'attuatore piezoelettrico. In accordo con la teoria delle tecniche a vibrazione acustica, una volta eccitato l'oggetto con un segnale di attuazione $V_t(t)$ quest'ultimo si propaga al suo interno generando una risposta caratteristica $V_r(t)$. In generale risulta necessario acquisire le forme d'onda che si sviluppano. È quindi necessario che il microcontrollore sia in ascolto nel momento giusto. Per questo scopo si è predisposto un piccolo *buffer* circolare in cui acquisire i dati campionati sul canale analogico/digitale 0. Nella fase iniziale, analizzando tale buffer, il microcontrollore deve rilevare quando è stato impartito l'ordine d'eccitazione: si tratta di una struttura dati particolare che può essere considerata di grandezza infinita perché capo e coda coincidono, come un anello che viene percorso e riempito in circolo. Una volta che il microcontrollore si accorge della presenza di un segnale $V_t(t)$, in particolare questo avviene rilevando valori di tensione superiori ad una soglia di riferimento, passa alla fase successiva, in cui cambia immediatamente il canale

analogico-digitale d'ascolto ed inizia a salvare tutti i dati ricevuti dal sensore piezoelettrico in un *buffer* lineare di dimensioni maggiori, nel quale dovranno essere memorizzati tutti i campioni della forma d'onda $V_r(t)$. Il lettore interessato può visionare in Figura 25 parte del codice C responsabile delle operazioni appena descritte, si notino l'utilizzo dei *buffer* di campionamento ed i cicli *while* in attesa dei segnali voluti.

```

// Inizio procedura ciclica.
while(1){
    // Scelta del canale positivo AN0 e del canale negativo VREF-
    ADCHSbits.CHONA = 0;
    ADCHSbits.CHOSA = 0;
    // Accensione Convertitore A/D.
    ADCON1bits.ADON = 1;
    // Impulso d'attuazione Vt(t) a 5 v per 200 us, poi a 0 Volt
    PORTBbits.RB7 = 1;
    __delay_us(200);
    PORTBbits.RB7 = 0;
    // Inizio procedura di campionamento. Ciclo while in attesa di un picco.
    while (enableSampling){
        // Inizio Campionamento.
        ADCON1bits.SAMP = 1;
        __delay_us(10);
        // Inizio Conversione
        ADCON1bits.SAMP = 0;
        while (!ADCON1bits.DONE);

        value = circularBuffer[currentPosition1++] = ADCBUF0;
        if (currentPosition1 == CIRCULAR_BUFFER_SIZE)
            currentPosition1 = 0;
        if ((highLevel == 1) && (value < SOGLIA_MIN))
            enableSampling = 0;
        if (value > SOGLIA_MAX) highLevel = 1;
        else highLevel = 0;
    }
}
// Scelta del canale positivo AN1 e del canale negativo VREF-
ADCHSbits.CHOSA = 1
// Ciclo con Buffer per campionare l'onda sonora Vr(t) che attraversa l'oggetto.
while (currentPosition2 < LINEAR_BUFFER_SIZE){
    // Inizio Campionamento.
    ADCON1bits.SAMP = 1;
    __delay_us(10);
    // Inizio Conversione
    ADCON1bits.SAMP = 0;
    while (!ADCON1bits.DONE);
        linearBuffer[currentPosition2++] = ADCBUF0;
}
}

```

Figura 25: Programma d'acquisizione in codice C eseguito dal dsPIC30F3013.

Filtraggio dei segnali acquisiti

Prima di poter procedere con l'elaborazione dei segnali acquisiti dal microcontrollore bisogna assicurarsi che siano esenti da interferenze come *spike* e rumore di fondo, per questo motivo si è deciso di utilizzare un filtro dedicato, specialmente sul segnale di risposta $Vr(t)$ che deve essere molto preciso e pulito. La scelta del filtro è stata ponderata valutando le particolari esigenze di progetto e cercando il giusto compromesso. Inizialmente si è cercato di capire quale fosse la scelta migliore tra le due macrofamiglie esistenti: filtri analogici e digitali.

Un filtro analogico consiste in un circuito elettronico a componenti discreti che può essere incrementato di ordine aumentando il numero di stadi e quindi la quantità fisica di componenti utilizzati come resistenze, capacità o induttanze. Opera su segnali analogici continui nel tempo manipolandoli direttamente al suo ingresso, fornendo in uscita un segnale ripulito da parti del contenuto armonico non desiderate, senza però modificarne la porzione voluta. Tuttavia l'utilizzo di un filtro analogico per il nostro progetto comporta alcuni problemi, primo fra tutti la difficoltà di ottenere alte prestazioni ed un buon fattore di merito senza aumentare esponenzialmente costi ed ingombro, poi bisogna considerare i possibili difetti interni dei componenti discreti e la loro diversità, essi presentano sempre valori imprecisi che variano nel range di tolleranza determinato dal costruttore e sono anche influenzati dall'ambiente esterno, specialmente la temperatura. Inoltre è rischioso progettare e costruire un filtro analogico su scheda che possa essere difficilmente modificato in base alle esigenze, specialmente quando il progetto è un prototipo sperimentale soggetto continuamente a modifiche e tarature.

Avendo a disposizione un microcontrollore relativamente potente si è quindi pensato di programmare al suo interno un filtro digitale, ovvero un tipo di filtro che opera sui segnali precedentemente campionati e quindi già discreti nel tempo. Ogni filtro digitale è caratterizzato da una propria funzione di trasferimento programmata a priori dall'utente e da particolari coefficienti che ne determinano il comportamento, al segnale in ingresso vengono quindi applicate funzioni matematiche (somme, moltiplicazioni, ritardi, retroazioni) che possono essere modificate in qualsiasi momento. Queste caratteristiche di versatilità rendono possibile la progettazione di filtri molto complessi, con conseguenti aumenti in costi di memoria e tempi di elaborazione. I filtri digitali implementabili facenti parte della famiglia dei sistemi LTI (Lineari Tempo Invarianti) possono essere suddivisi in due categorie: FIR (Finite Impulse Response) e IIR (Infinite Impulse Response). I filtri FIR sono sistemi LTI causali caratterizzati da una risposta all'impulso finita e da una funzione di trasferimento polinomio in z^{-1} . Il principale vantaggio che li caratterizza è

l'assenza di retroazioni che evita l'aggravarsi della propagazione di errori durante le iterazioni e determina una conseguente stabilità, dato che i poli sono all'origine. Possono essere facilmente progettati per ottenere linearità in fase impostando la sequenza di coefficienti simmetrica. L'unico vero svantaggio dei filtri FIR è la loro complessità computazionale che comporta costi di memoria notevoli, per questo spesso la scelta ricade sui filtri IIR realizzabili con meno parametri e quindi con meno risorse di sistema, nonostante siano caratterizzati da una maggiore instabilità e da una maggiore distorsione in fase. L'implementazione di un filtro sul microcontrollore dsPIC30F3013 è stata possibile utilizzando un software dedicato chiamato dsPIC Filter Design [29] (Figura 26).

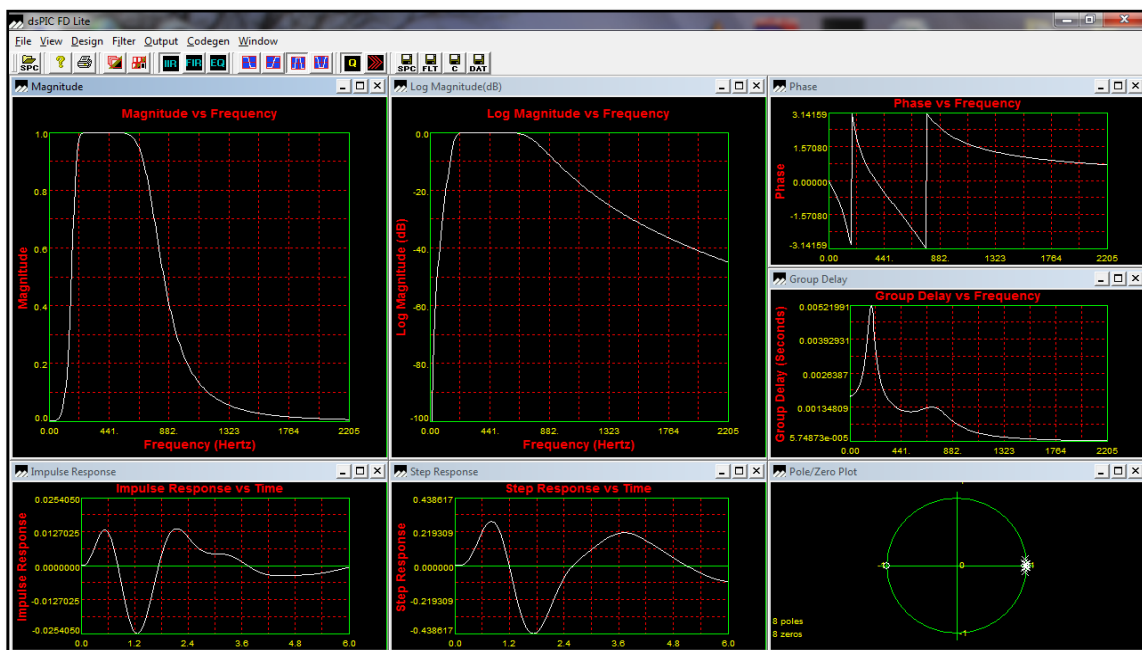


Figura 26: Interfaccia grafica del software dsPIC Filter Design [23] per la progettazione del filtro.

L'interfaccia del programma di sviluppo permette di visionare diversi grafici che rappresentano le caratteristiche del filtro progettato e ne forniscono una panoramica completa in banda di frequenza e nel tempo: Modulo, Fase, Ritardo di Gruppo, Risposta impulsiva e diagramma poli/zeri. Il software in questione permette di progettare diversi tipi di filtri FIR e IIR, ma la funzione più interessante è la capacità di generare file sorgenti direttamente in linguaggio C o Assembly contenenti i coefficienti del filtro creato. In questo modo possono essere integrati direttamente nella piattaforma di sviluppo MPLAB e nel progetto del programma, per poi essere caricati e testati sul

microcontrollore. Inizialmente si sono progettati alcuni filtri FIR prevalentemente a finestra Gaussiana, come previsto però, nonostante la loro bontà si è dovuto abbandonare l'idea di un loro utilizzo a causa di problemi di saturazione della memoria del dsPIC30F3013. Quindi si è optato per i più semplici IIR. Sono stati progettati filtri di Bessel, Butterworth e Tschebyscheff di diverso ordine con le seguenti specifiche:

- Frequenza di Campionamento: 50 KHz
- Range di Passa-Banda: 200 - 700 KHz
- Range di Stop-Banda: 100 - 1300 KHz
- Ripple di Passa-Banda massimo: - 1 dB
- Ripple di Stop-Banda massimo: - 5 dB
- Ordine: 4° e 8°

La linearità in fase del filtro non è risultata un requisito così fondamentale in quanto l'errore dovuto ai ritardi è trascurabile sulle misurazioni effettuate. Per cui si è abbandonato l'utilizzo dei filtri di Bessel che hanno un buon ritardo di gruppo in banda passante, ma che non presentano particolari prestazioni in modulo, specialmente in selettività. I filtri di Tschebyscheff hanno un'ottima selettività in modulo, ma presentano difetti di linearità, per cui la scelta è caduta su un filtro di Butterworth dell'ottavo ordine dalle prestazioni in linea alle nostre necessità e costi computazionali accettabili. In Figura 27 si può visionare il modulo del filtro progettato.

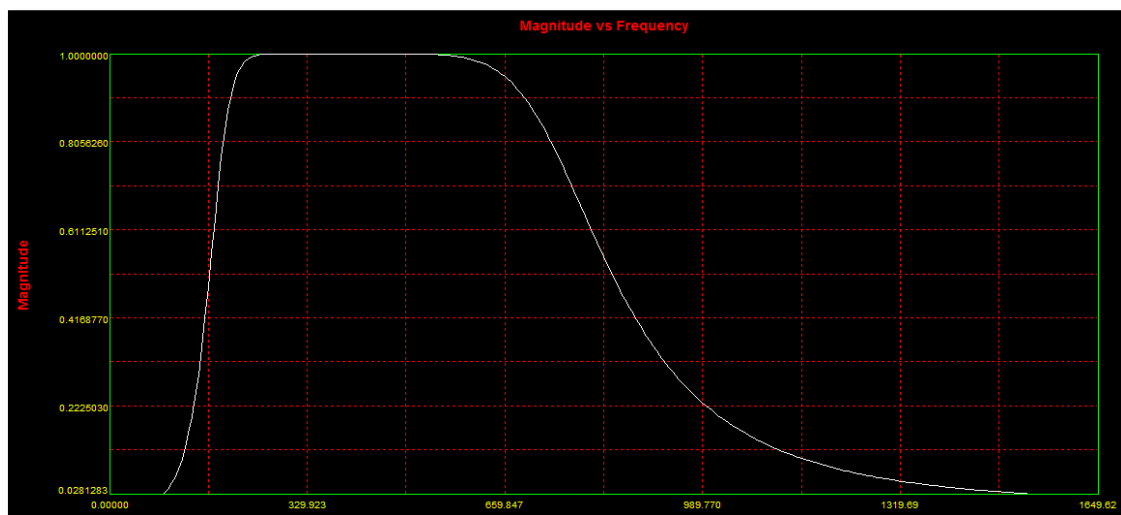


Figura 27: Filtro di Butterworth di ordine 8 progettato con il software dsPIC Filter Design [29].

Il lettore interessato può visionare parte del codice sorgente in *Assembly* in Figura 28, risultato della progettazione avvenuta grazie al software dsPIC Filter Design [29]. In particolare i coefficienti del filtro IIR di Butterworth sono implementati direttamente nel codice generato.

```
ButterworthPBFCoefs:
    .hword    0x02E5      ; b( 1,0)/2
    .hword    0x0000      ; b( 1,1)/2
    .hword    0x79E7      ; a( 1,1)/2
    .hword    0xFD1B      ; b( 1,2)/2
    .hword    0xC5CC      ; a( 1,2)/2
    .hword    0x018B      ; b( 2,0)/2
    .hword    0x0000      ; b( 2,1)/2
    .hword    0x7C98      ; a( 2,1)/2
    .hword    0xFE75      ; b( 2,2)/2
    .hword    0xC2DA      ; a( 2,2)/2
    .hword    0x02C6      ; b( 3,0)/2
    .hword    0x0000      ; b( 3,1)/2
    .hword    0x7D44      ; a( 3,1)/2
    .hword    0xFD3A      ; b( 3,2)/2
    .hword    0xC2AC      ; a( 3,2)/2
    .hword    0x0259      ; b( 4,0)/2
    .hword    0x0000      ; b( 4,1)/2
    .hword    0x7F3E      ; a( 4,1)/2
    .hword    0xFDA7      ; b( 4,2)/2
    .hword    0xC0B9      ; a( 4,2)/2
```

Figura 28: Programma in codice *Assembly* contenente i coefficienti del filtro di Butterworth progettato con il software dsPIC Filter Design [29].

Scheda Display per la visualizzazione dati

Effettuata la misurazione ed elaborazione dei dati relativi al frutto campione è possibile visionare i risultati in una seconda scheda dedicata al pilotaggio di un Display LCD alfanumerico. Si può visionare lo schematico completo in Figura 29.

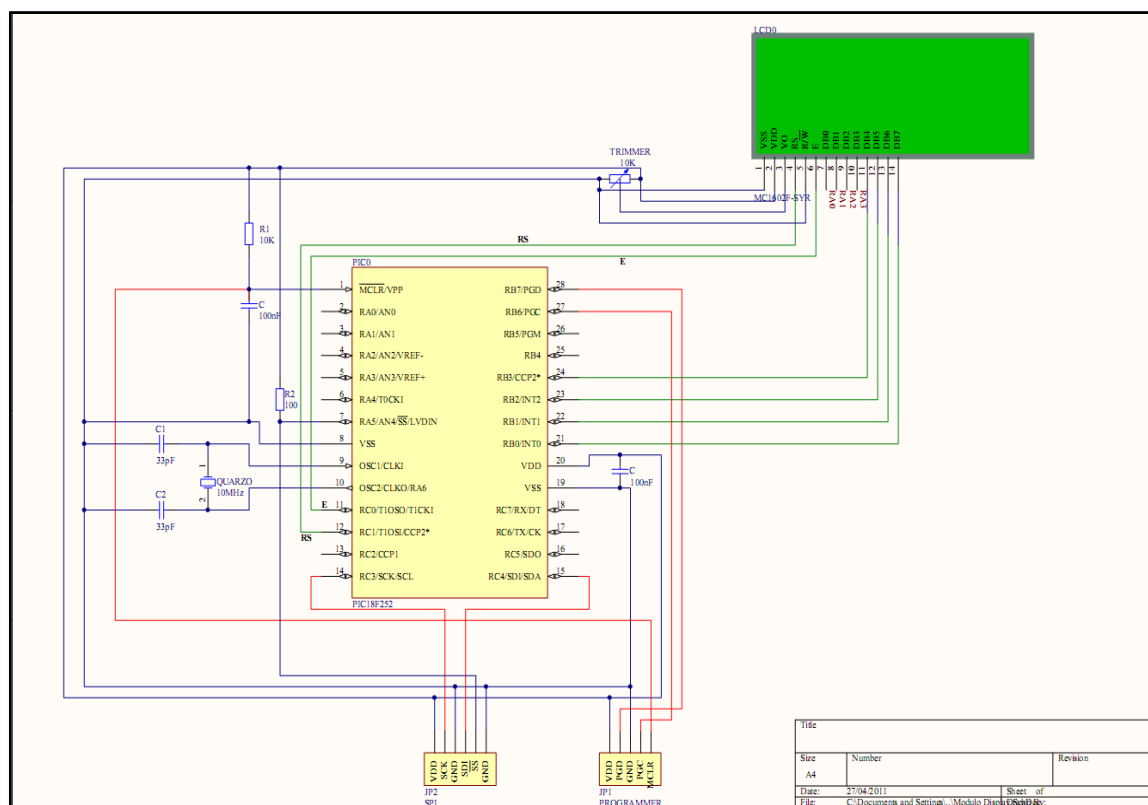


Figura 29: Schematico della scheda display disegnato con CAD Altium Designer.

Visualizzare in tempo reale i dati processati e ricevuti dalla scheda madre è stato possibile solo dopo aver progettato in modo corretto determinati elementi, sia di tipo *hardware* che *software*. Di seguito saranno illustrate le scelte implementative effettuate.

Progettazione hardware

La scheda di visualizzazione contiene un microcontrollore opportunamente interfacciato e programmato per poter comunicare tramite un protocollo seriale con la scheda madre. Si tratta di un PIC18F252 (Figura 30) dedicato interamente all'inizializzazione dello schermo LCD ed alla comunicazione con il microcontrollore principale dsPIC30F3013 montato sulla scheda madre della quale abbiamo parlato precedentemente.

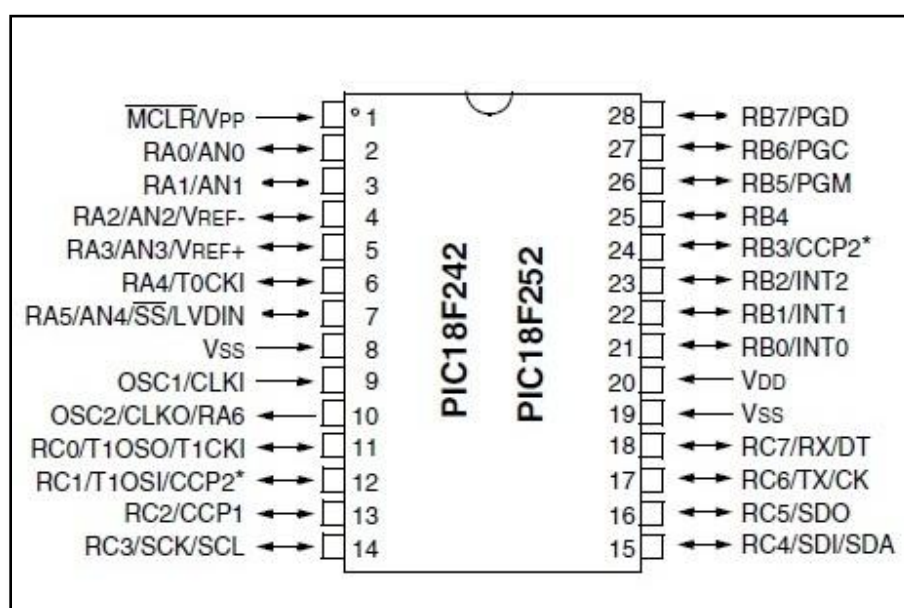


Figura 30: Immagine da datasheet del PIC18F252 della Microchip, versione SPDIP [29].

La scelta di montare un microcontrollore PIC18F252 è stata effettuata considerando la necessità di dover pilotare uno schermo LCD Displaytech 162 avente le seguenti caratteristiche: uno schermo a 2 linee di 16 colonne ciascuna per la scrittura dei caratteri, 16 PIN di collegamento di cui 8 per la ricezione dati, 2 per l'alimentazione (Alimentazione VDD e Massa GND) e gli altri di settaggio e controllo (Enable, Read/Write, Luminosità, Contrasto). La scelta è stata anche influenzata dal fatto di voler utilizzare un microcontrollore relativamente semplice che possa funzionare a frequenze di 10 MHz, poco costoso e che supporti al suo interno un modulo per la comunicazione seriale. La scheda Display deve essere connessa alla scheda madre tramite un connettore dedicato al fine di implementare la comunicazione seriale SPI (Serial Peripheral

Interface) tra le due schede. Questo tipo di comunicazione permette il trasferimento e la ricezione sincrona di pacchetti dati da 8 bit ciascuno, è tra le più semplici implementabili e richiede un numero limitato di PIN di connessione. Infatti i segnali ricevuti dalla scheda madre sono i seguenti:

- VDD e GND: alimentazione esterna a 5 V e massa.
- SCK (Serial Clock): Clock per la temporizzazione del protocollo SPI
- SDI/SDO (Serial Data In/Out): linee dati In/Out del protocollo SPI
- SS (Slave Select): linea per la selezione della modalità Master o Slave.

Volendo implementare una comunicazione SPI unidirezionale tra il Master (dsPIC30F3013 - Scheda Madre) e Slave (PIC18F252 - Scheda Display) si è impostato lo Slave Select direttamente a massa tramite un jumper rimovibile e si è eliminato il feedback di avvenuta ricezione da Slave a Master, questa scelta ha permesso il risparmio di collegamenti inutili riducendo la connessione effettiva da 6 cavi iniziali a solamente 4. In Figura 31 si possono notare in dettaglio i collegamenti necessari tra i microcontrollori per una corretta implementazione del protocollo SPI.

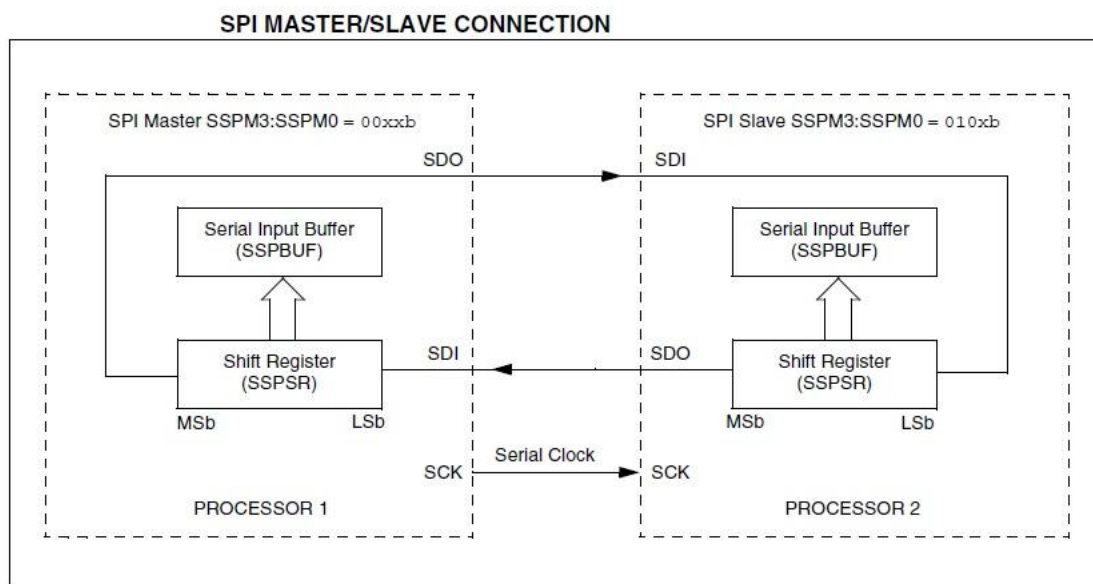


Figura 31: Collegamenti necessari per implementare il protocollo SPI Master/Slave [29].

La costruzione del modulo Display è stata effettuata in una millefori separata dalla scheda madre con lo scopo di mantenerla autonoma, rimovibile in qualsiasi momento e rimpiazzabile da altri modelli (vedi Figura 32).

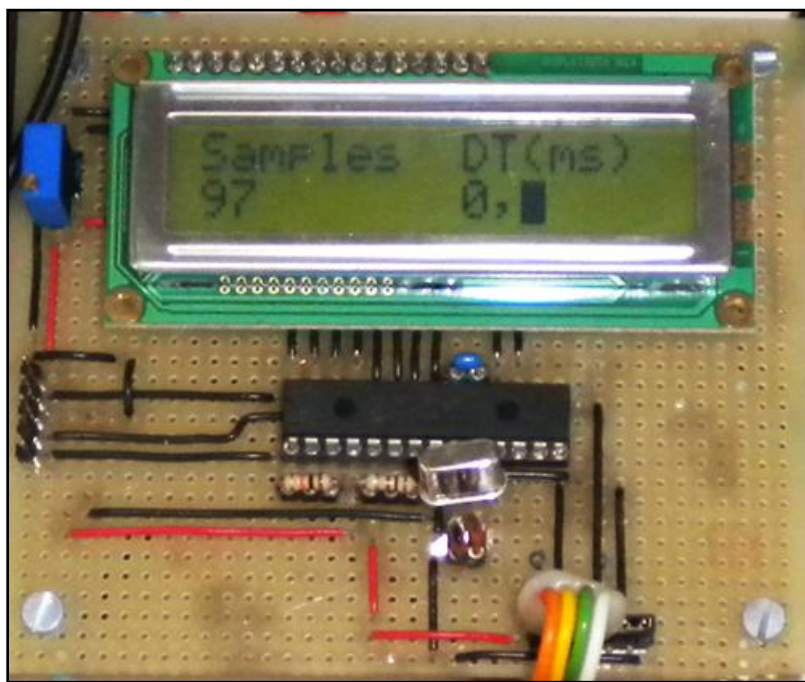


Figura 32: Scheda elettronica millefori responsabile della visualizzazione dati, dimensioni reali.

Progettazione software

Il PIC18F252 è stato programmato via software in maniera analoga al dsPIC30F3013 tramite piattaforma MPLAB IDE e programmatore PICkit3, ma il compilatore necessario è MPLAB-C18 [29], specifico per la famiglia dei microcontrollori PIC18. Forniremo una descrizione generale dei compiti da eseguire. Le prime linee di codice del sorgente *main* contengono i richiami alle librerie fondamentali che ne determinano il funzionamento, in particolare i moduli necessari alla comunicazione SPI, I/O ed il protocollo di comunicazione per le funzioni del Display, precedentemente implementato anche nel dsPIC30F3013 per facilitare la comunicazione dei comandi da Master a Slave. Poi sono definite le variabili per la ricezione del comando dal Master e la trasmissione dei dati verso il Display LCD. Seguono i settaggi delle porte di ingresso/uscita, l'inizializzazione

del modulo di comunicazione seriale e del menù LCD standard che verrà stampato sullo schermo. Affinché la comunicazione seriale funzioni, lo Slave è sempre in ascolto di un'eventuale istruzione ad 8 bit mandata dal Master, che una volta inviata viene letta e salvata nella variabile *cmd*. Il compito dello Slave è di discriminare il contenuto della variabile ed associarlo ad una particolare funzione, che contiene le istruzioni di libreria dello schermo LCD caricate precedentemente nel sorgente *lcd.c*. Si tratta di istruzioni semplici come ad esempio inizializzare lo schermo, pulirlo, spostare il cursore in una determinata posizione, scrivere un numero intero oppure una stringa. Nonostante le istruzioni siano semplici non è scontato far comunicare due microcontrollori così diversi tra loro, bisogna fare attenzione ai settaggi, rispettare le tempistiche dell'LCD che necessita di particolari tempi di inizializzazione e fornire ritardi tra un'istruzione e la successiva di almeno 10 ms.

Il lettore interessato può visionare in Figura 33 e Figura 34 alcuni listati C implementati su *Master* e *Slave*. In particolare si vuole enfatizzare l'implementazione di un protocollo di comunicazione comune ad entrambi i microcontrollori, che permette la comprensione dei comandi trasmessi. In questo modo i comandi ad 8 bit trasmessi dal *Master* vengono riconosciuti ed eseguiti correttamente dallo *Slave*, che a sua volta interagisce con il Display LCD.

```
// Funzioni del Master responsabili dell'invio di pacchetti di comando ad 8 bit

unsigned char writeUspil( unsigned char data ){
    SPI1BUF = data;           // Scrivi sul buffer per trasmettere
    while(!SPI1STATbits.SPIRBF); // Aspetta la fine del trasferimento
    return SPI1BUF;          // Leggi il valore ricevuto
}

char writeCspil( char *wrptr ){
    SPI1BUF = *wrptr;        // Scrivi sul buffer per trasmettere
    while(!SPI1STATbits.SPIRBF); // Aspetta la fine del trasferimento
    return SPI1BUF;          // Leggi il valore ricevuto
}
```

Figura 33: Programma in codice C delle funzioni del *Master* (dsPIC30F3013).

```

// Definizione comandi standard per il protocollo SPI
#define CMD_INIT    0b00000000    // Inizializza LCD
#define CMD_CLEAR   0b00000001    // Pulisci LCD
#define CMD_GOTO    0b00000010    // Vai a posizione (Riga, Colonna)
#define CMD_PUTCH   0b00000011    // Scrivi carattere
#define CMD_PUTS    0b00000100    // Scrivi stringa
#define CMD_PUTUN   0b00000101    // Scrivi intero
#define CMD_PUTSN   0b00000110    // Scrivi intero con segno
#define CMD_NIBBLE  0b00000111    // Scrivi nibble
#define CMD_MENU    0b00001001    // Menu Standard
#define CMD_WRITE   0b00001010    // Scrivi un byte
#define CMD_CMD     0b00001011    // Invia comando rapido a LCD

```

Figura 34: Programma in codice C contenente la libreria di comandi per il *display* LCD implementata nel *Master* e nello *Slave*.

Scheda di potenza per l'attuazione

Come abbiamo visto in precedenza l'eccitazione meccanica dei campioni di frutta può essere effettuata in diversi modi sfruttando molteplici tecniche. La scelta è stata effettuata considerando le nostre esigenze: spazio ridotto, costi relativamente bassi, rapidità d'esecuzione, semplicità e ripetibilità del test. La risposta alle nostre necessità è stato l'utilizzo di trasduttori piezoelettrici.

Diverse prove condotte in laboratorio hanno rivelato che i modelli *cantilever*, capaci di piegare una loro estremità in modo proporzionale alla tensione fornita ai loro capi, sono più adatti dei piezoelettrici a *disk bender* in quanto l'energia trasferita al frutto non è sufficiente per generare un'onda sonora apprezzabile ed effettuare adeguate misurazioni. Dopo una campagna di *testing* durata alcuni mesi si sono riscontrati difetti di fragilità anche in quest'ultimi, per cui si è optato per un modello multistrato più robusto e solido.

Inizialmente il pilotaggio dell'attuatore piezoelettrico è stato possibile grazie ad un amplificatore dedicato capace di fornire un segnale ad 80 V ai suoi capi. Per rendere autonoma la nostra scheda di controllo e far sì che produca un segnale di pilotaggio del piezoelettrico, compatibile con quello generato dell'amplificatore di potenza dedicato, è stato utilizzato un modulo elettronico di potenza *stand alone* (vedi Figura 35) progettato da Avdic [31] capace di fornire la tensione necessaria al piezoelettrico d'attuazione responsabile dell'impatto sul frutto. Consiste in un alimentatore contenente un convertitore DC/DC Boost ed una parte di pilotaggio e regolazione LEG push-pull.

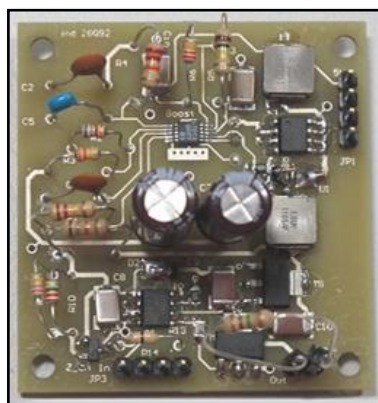


Figura 35: Scheda elettronica PCB di potenza responsabile del pilotaggio del trasduttore piezoelettrico d'attuazione [31], dimensioni reali.

Le nostre specifiche di progetto prevedono una scheda madre alimentata solamente con tensione bipolare ± 5 V, quindi il modulo di potenza è stato progettato per fornire tensioni elevate (80-100 V) partendo da tensioni d'ingresso di gran lunga inferiori. Inoltre il regolatore presente sulla scheda permette l'interfacciamento con la scheda madre principale, la quale è responsabile del pilotaggio tramite impulsi rettangolari aventi Duty Cycle regolabile via software. Il segnale d'ingresso che consiste in un treno di impulsi rettangolari di voltaggio massimo $V_{in} = 5$ V viene amplificato e mandato ai capi dell'attuatore piezoelettrico, che inizia a funzionare in modalità *cantilever* piegandosi a comando, e colpendo così il frutto.

In Tabella 3 si possono osservare le principali proprietà di alcuni modelli tipici di trasduttori piezoelettrici utilizzati.

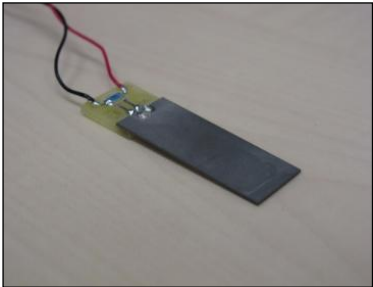
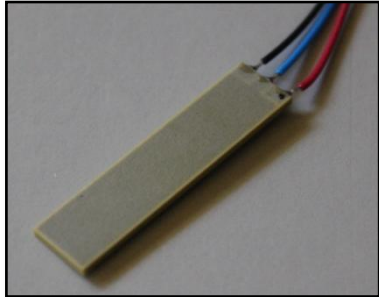
Attuatori Utilizzati	Stiffness (N/m)	Capacitance (nF)	Max Voltage ($\pm V_p$)	Freq. Resonance (Hz)	Free Deflection ($\pm \mu\text{m}$)
Piezo Systems Q-303 Bender [27] 	760	52	± 90	275	± 315
Noliac CMBP05 Plate Bender [30] 	6500	2 x 320	200 (± 100)	490	± 345

Tabella 3: Caratteristiche dei trasduttori piezoelettrici utilizzati per l'attuazione.

Piattaforma per analisi reologiche di singoli oggetti

Costruite le singole schede elettroniche si è proceduto con le fasi di interfacciamento e *testing* per eseguire il collaudo e verifica delle loro funzionalità. Per fare questo è stato allestito un banco di misura (vedi Figura 36) nel laboratorio di Elettronica di Cesena della seconda facoltà di Ingegneria di Bologna. Si può osservare il sistema assemblato e correttamente interfacciato all'attuatore ed al sensore piezoelettrico, entrambi montati su un supporto meccanico regolabile. Sul computer sono installati i software di programmazione, progettazione e *debug* di cui abbiamo parlato in precedenza. Una volta collegato il PC ai microcontrollori è possibile modificarne le impostazioni in base alle proprie esigenze, come ad esempio il funzionamento in automatico, la velocità d'esecuzione del programma e la taratura delle soglie dei segnali. È anche possibile estrapolare e visionare i dati relativi all'onda $V_r(t)$ che si propaga attraverso il frutto, ed infine graficarla utilizzando MATLAB [32].

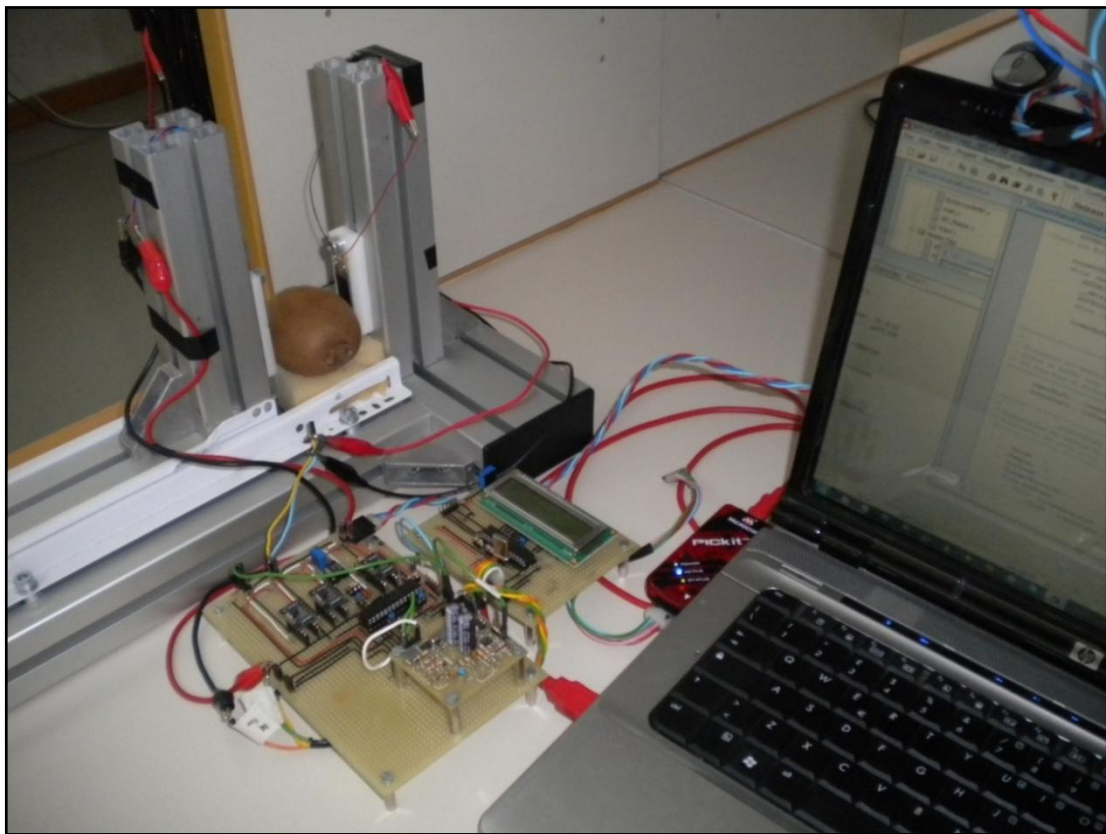


Figura 36: Piattaforma reologica in fase di *testing* presso i laboratori di Elettronica di Cesena.

Campagna di Misura

Le strumentazioni sono state inizialmente tarate su diversi campioni di frutta, principalmente su mele (*Malus Domestica*), pesche (*Prunus Persica*) e kiwi (*Actinidia Deliciosa*) aventi dimensioni e caratteristiche fisiologiche differenti. Appurato il corretto funzionamento del sistema, si è iniziata una campagna di misura con lo scopo di verificare e dimostrare la possibilità di costruire un sistema industriale *online* che sfrutti la tecnica a vibrazione acustica implementata. È stata reperita una cassetta di kiwi da cui sono stati selezionati cinque campioni aventi dimensioni paragonabili tra loro, ma stadi di maturazione differenti. Un primo campione di kiwi proveniente dal lotto avente caratteristiche comuni è stato usato come modello di calibrazione della strumentazione per ottenere un *range* noto dei segnali. In Figura 37 si può osservare la porzione di un tipico segnale $V_r(t)$ campionato dalla scheda elettronica, filtrato dal microprocessore e graficato con software MATLAB, si noti che la porzione di segnale campionato permette di dare una prima stima del ΔT di propagazione tra l'inizio della forma d'onda ed il primo picco di circa 1.2 ms, compatibile con i dati sperimentali ed il metodo Muramatsu [28].

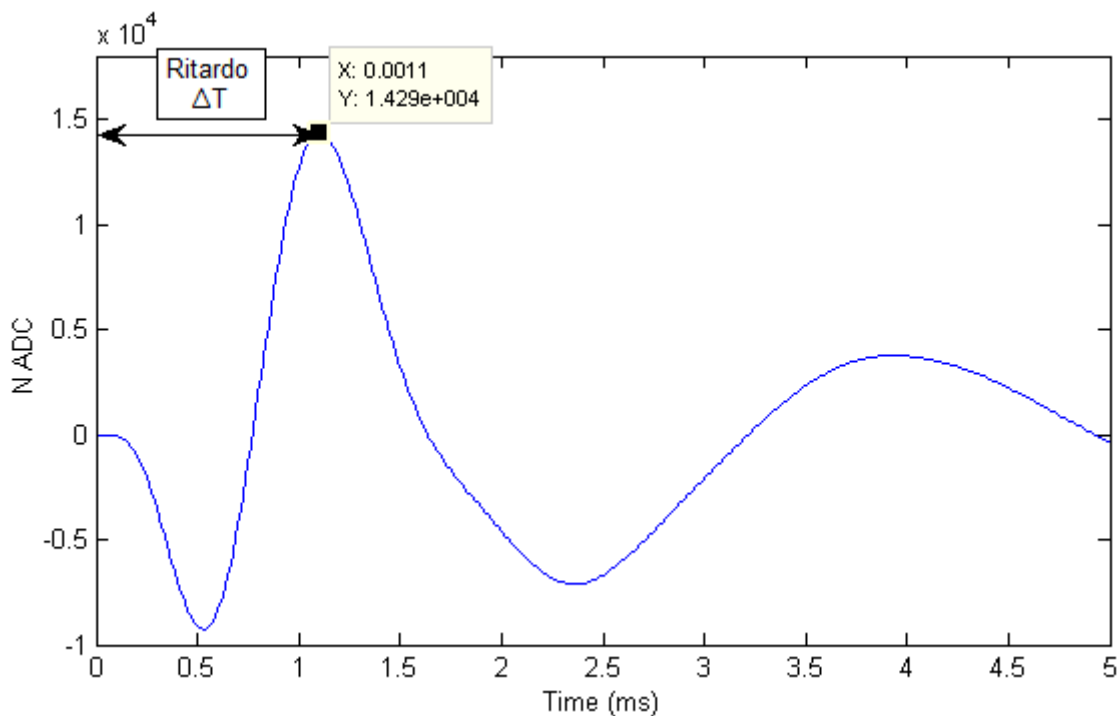


Figura 37: Segnale $V_r(t)$ di risposta tipico di un kiwi, estratto dal microcontrollore dsPIC30F3013 e graficato con software MATLAB [32], riproduzione fedele del metodo Muramatsu [28].

Gli altri quattro kiwi sono stati suddivisi in base alla loro maturazione: molto duro, duro, medio, maturo. Sono stati pesati e se n'è misurato il diametro.

La prima fase della campagna di misurazione è stata fatta per avere un riscontro oggettivo su un importante dato sperimentale, ovvero le risposte $V_r(t)$ misurate sul singolo campione in diverse posizioni sono compatibili ed hanno ritardi ΔT confrontabili [28], anche se in alcuni casi si può notare una differenza di ampiezza che indica una variazione dell'energia dispersa.

La seconda fase della campagna di misurazione riguarda uno studio più approfondito sull'effettivo grado di maturazione dei kiwi. Si è cercato un riscontro tra una valutazione tattile dello stato fisiologico dei kiwi ed una valutazione reologica analitica con diversi indici di maturazione disponibili in letteratura calcolati dalle forme d'onda e dalle caratteristiche di ogni singolo campione.

In Tabella 4 sono riportati i dettagli delle misurazioni e dei calcoli dei ritardi ΔT effettuati su due kiwi dalle caratteristiche più simili tra loro e con maturazione rispettivamente media ed avanzata. E' stato osservato che i ritardi considerati aumentano proporzionalmente con l'aumentare del grado di maturazione ed in Figura 38 si può riscontrare la differenza, seppur minima, tra le curve di risposta $V_r(t)$.

Oggetto Campione (Kiwi)	Ritardo ΔT (ms)
Medio	1.088
Maturo	1,113

Tabella 4: Misurazioni dei ritardi ΔT su campioni di kiwi a diverso stadio di maturazione.

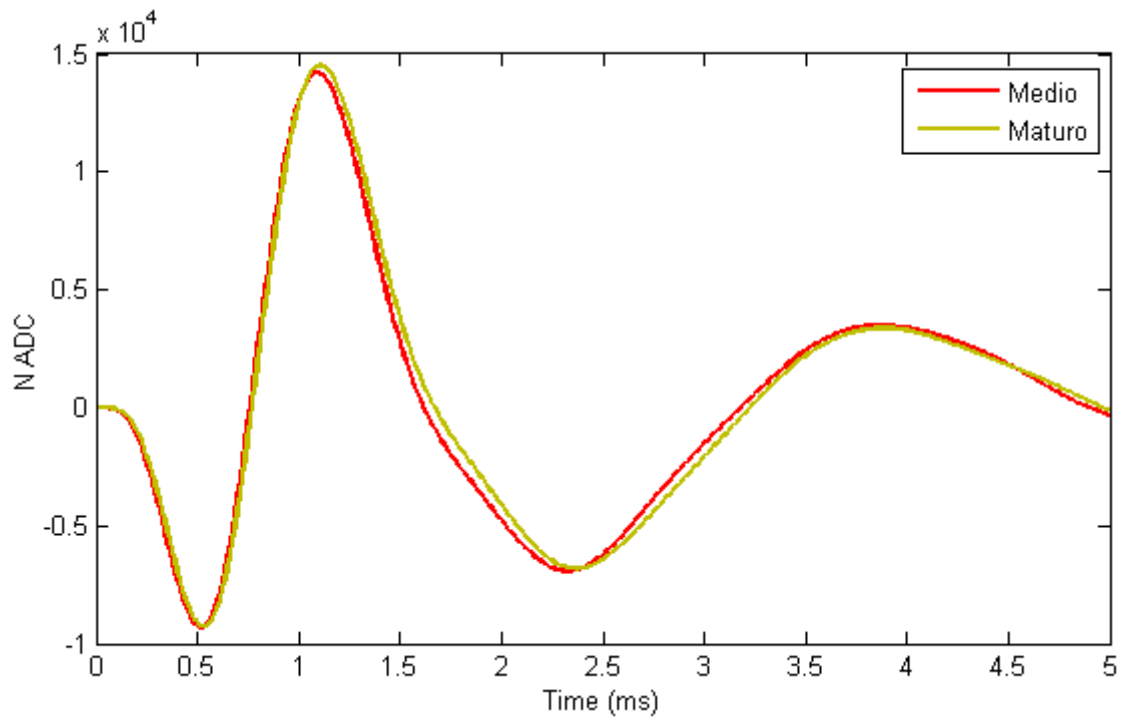


Figura 38: Segnali di risposta $V_r(t)$ di due kiwi a maturazione differente.

Conclusioni

Obiettivo di questa tesi è stata la progettazione e lo sviluppo di un sistema elettronico capace di svolgere l'analisi reologica di singoli oggetti in tempo reale.

È stata illustrata una panoramica dettagliata sui metodi di misurazione della maturazione della frutta attualmente presentati in letteratura scientifica differenziando metodi distruttivi e non distruttivi, illustrandone le tecniche utilizzate più diffuse e valutandone le caratteristiche che le contraddistinguono, pregi e difetti anche in ottica industriale, ovvero tenendo conto dei compromessi di costo. Si è successivamente passati ad illustrare la fase di progettazione di un'architettura di sistema molto versatile, capace di svolgere analisi reologiche su singoli oggetti in tempo reale sfruttando diverse tecniche implementabili in modo modulare, a basso costo ed in un'ottica di sviluppo futuro.

Si è proseguiti con lo studio di un caso specifico relativo ad una tecnica non distruttiva a vibrazione acustica applicata a campioni di frutta operante grazie a trasduttori piezoelettrici *cantilever* in modalità sensore ed attuatore, capaci di sollecitare il frutto ed effettuare il sensing dell'onda sonoro-meccanica propagatasi al suo interno, compatibilmente con il metodo illustrato e sviluppato da Muramatsu [28].

Si è poi passati alla progettazione del prototipo su millefori che consiste in più schede elettroniche interfacciate aventi compiti separati: questo è stato possibile dopo aver selezionato accuratamente processori e componenti mantenendo un profilo *low cost* ed aver realizzato schematici circuitali dettagliati.

Sono seguite fasi intense di costruzione, interfacciamento, prototipazione elettronica e di programmazione dei microcontrollori, quest'ultima ha portato allo sviluppo di algoritmi efficaci per l'acquisizione, il filtraggio e l'elaborazione dei segnali, ma anche di un protocollo di comunicazione seriale e di controllo di un modulo *display*.

Infine è seguita una procedura di calibrazione della piattaforma reologica, ed una campagna di misurazione su campioni di frutta al fine di valutare il corretto funzionamento del sistema, le sue potenzialità e cercando riscontri con i dati teorici.

Sviluppi futuri

Trattandosi di un prototipo assemblabile ed aperto a modifiche sono presenti margini di miglioramento e si possono esplorare ed aggiungere nuove funzionalità. Come ad esempio l'aggiunta di un supporto per i campioni dotato di bilancia capace di fornirne in tempo reale il peso al microcontrollore. Ulteriori dati di elaborazione possono essere forniti dal supporto meccanico, che può essere migliorato con l'aggiunta di un Encoder incrementale capace di misurare la distanza effettiva tra attuatore e sensore piezoelettrico, quindi di conseguenza conoscere il tratto dell'oggetto che l'onda sonora deve percorrere.

Dopo aver aggiunto nuove funzionalità ed aver perfezionato le tecniche sarà possibile creare una scheda PCB dalle dimensioni molto ridotte. Considerando la possibilità di poter utilizzare il sistema anche in applicazioni industriale, unita alla possibilità del microcontrollore di effettuare più misurazioni in parallelo, si potrebbe in linea di principio sviluppare una macchina automatica ad elevato *throughput*, anche di decine di campioni al minuto, con prestazioni ulteriormente migliorabili grazie all'utilizzo di microcontrollori dsPIC più performanti ed ottimizzazioni di codice per ridurre le tempistiche d'esecuzione. L'architettura realizzata presenta inoltre costi di produzione estremamente ridotti e garantisce un'ampia flessibilità per essere utilizzato in applicazioni di analisi delle proprietà reologiche di singoli frutti od oggetti.

Ringraziamenti

Facile a dirsi, difficile a farsi. Siete troppi e la mia testolina vuota dimenticherà sicuramente qualcuno, però non disperate perché ora avrò più tempo libero anche per voi.

In no particular order, un grazie di cuore a:

Aldo Romani per la sua cortesia, disponibilità nonostante gli impegni, per avermi dato suggerimenti importanti ed avermi indirizzato sempre nella strada giusta nonostante le difficoltà incontrate lungo il percorso. Enrico Macrelli, un punto di riferimento che mi ha seguito, supportato e sopportato durante tutte le fasi di progettazione nell'arco di circa 5 mesi dal laboratorio dell'aeroporto di Forlì ARCES fino ai laboratori di Elettronica di Cesena, dandomi consigli preziosissimi, aiutandomi durante la realizzazione della scheda e durante la stesura di questo lungo e complesso elaborato. I Sortroniani, in particolare Alberto ed Elia che mi hanno aiutato e fatto ridere nonostante stessero realmente lavorando, andando oltre il loro dovere. L'unico, insuperabile (quasi come il tonno) Cristiano con cui ho lavorato assieme in modo affiatato alla scheda gemella Display ed ho condiviso momenti epici (389cBanana *Docet*). I ragazzi del laboratorio, il grande Matteo Filippi da cui ho carpito metà delle sue conoscenze, quindi a sua detta ne so davvero poca, Michele Dini che mi ha dato numerosi consigli quando tutto smetteva di funzionare, Mirza Avdic ed il Professor Rudi Paolo Paganelli che hanno sviluppato il modulo di potenza. I compagni di Università coi quali ho seguito i corsi e banchettato da Mr Burger: Alessandro Sangiorgi compagno di scherzoni e Mattia Paganelli che mi hanno sempre dato una mano, Enzo, Rita, Fabio, Luca, Marco, Dario, Meris, Manuel, Arno, Zoff: è stata una bella esperienza e spero di rivedervi tutti presto. Christian Morellini per le illuminanti lezioni di fisica. Tutti i ragazzi coi quali condivido da tanti anni i fine settimana, le escursioni, le giornate al mare, le magiche feste a tema di Capodanno, 1° Maggio, Ferragosto, le LAN, siete davvero troppi e non riesco nemmeno a contarvi. Gli accoliti del DH, siete forti e ci siamo proprio divertiti, speriamo di ricominciare a vederci presto! I miei genitori che hanno sempre creduto nelle mie capacità, che mi hanno sempre supportato e sostenuto in questi anni, dandomi la possibilità di crescere e di crearmi un futuro. Mio fratello Patrick che è sempre stato un riferimento, un grazie per i suoi silenzi illuminanti e per i nostri progetti strambi, un abbraccio. Purtroppo resto sempre il più bello, mi spiace =P. La Fede che ha intrattenuto i mitici Tom, Phil, la Cocca e tutti gli altri animali mentre studiavo. La casata Ruffilli per il sostegno ed i consigli, sono sempre da voi ed ormai è la mia seconda casa.

Ultima, ma sempre la prima: Valentina. Ho troppe cose di cui ringraziarti, una sola pagina non basterebbe. Grazie di cuore.

BIBLIOGRAFIA

1. Penetrometri PCE-Italia:
<http://www.pce-italia.it/html/strumenti-di-misura/misuratori/penetrometri.htm> ;
2. Postharvest Information Network/Measuring Fruit Firmness with a Penetrometer:
<http://postharvest.tfrec.wsu.edu/pages/N113A> ;
3. The Refractometer - Whole Foods Market Blog:
<http://blog.wholefoodsmarket.com/2008/09/the-refractometer/> ;
4. Paolo Bertolini, Daniele Missere. *“Frutticoltura Post-raccolta - Metodi innovativi di gestione dei frutti nella fase post-raccolta”*;
5. Progress s.r.l/ SACMI / Politecnico di Milano - *“Nasi elettronici e applicazioni in campo ambientale”*;
6. S.Focardi, I.Massa, A.Guzzoni. *“Fisica Generale - Elettromagnetismo”*, Dipartimento di Fisica dell’Università di Bologna, Casa Editrice Ambrosiana (2003);
7. Guglielmo Costa, Massimo Noferini. *“Metodi non distruttivi per valutare la qualità dei frutti e la sanità delle piante”*, 2008 ;
8. Veterinary Radiology - MRI of a kiwi fruit:
<http://www.veterinaryradiology.net/1444/mri-of-a-kiwi-fruit/> ;
9. Anna Minoja - Bruker BioSpin S.r.l. *“Applicazioni della Risonanza Magnetica Nucleare nella scienza degli alimenti”*;
10. V. Girgenti, C. Peano, N. Giuggioli. *“L’utilizzo della spettrofotometria NIR nella valutazione non distruttiva delle caratteristiche qualitative dei frutti”* ;

11. Hansatech Instruments:

<http://news.hansatech-instruments.com/2010/04/m-pea-multi-function-plant-efficiency.html> ;

12. Martin Geyer, Bernd Herold, Manuela Zude, Ingo Truppel. “*Non-Destructive Evaluation of Apple Fruit Maturity on the Tree*”, Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam-Bornim ;

13. Cartelat A., Cerovic Z.G., Goulas Y., Meyer S., Lelarge C., Prioul J.-L., Barbottin A., Jeuffroy M.-H. Gate P., Agati G. and Moya, I. (2005) “*Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (Triticum aestivum L.)*” *Field Crops Research*;

14. World of Molecules - Chlorophyll:

<http://www.worldofmolecules.com/life/chlorophyll.htm> ;

15. R.P. Haff, D.C. Slaughter, Y. Sarig, A. Kader, “*X-RAY Assesment of translucency in pineapple*”;

16. Emanuele Piraccini. “*Sistemi elettronici per la caratterizzazione reologica di materiali e oggetti mediante trasduttori piezoelettrici.*”, Tesi di Laurea ;

17. F. J. García-Ramos, C. Valero, I. Homer, J. Ortiz-Cañavate and M. Ruiz-Altisent. “*Non-destructive fruit firmness sensors: a review*”, *Spanish Journal of Agricultural Research* 3(1) (2005): 61-73;

18. Ian Harrison. “*Non-destructive testing for fruit quality assurance*” - Sinclair iQ Article;

19. Barreiro P., Moya A., Ruiz-Altisent M., Agulheiro A.C., García-Ramos F.J. Homer I., Moreda G., 2002a. “*On-line segregation of soft olives by means of differences in rebound trajectories*”. Proc Intl Conf Agricultural Engineering. Budapest, June 30-July 4, Paper 02-PH-023;
20. Bryan W.L., Anderson B.J., Miller J.M., 1978. “*Mechanically assisted grading of orange for processing*”. TASAE 21(6), 1226-31;
21. Takao, H. and S. Ohmori. 1994. “*Development of device for nondestructive evaluation of fruit firmness*”. JARQ. 28: 36–43;
22. Davie, I. J., N. H. Banks, P. B. Jeffery and C. J. Studman. 1996. “*Non-destructive measurement of kiwifruit firmness*”. N. Z. J. Crop Hortic. Sci. 24: 151–157;
23. Hung, Y. C., S. E. Prussia and G. O. I. Ezeike. 1999. “*Nondestructive firmness sensing using a laser air-puff detector*”. Postharvest Biol. Technol. 16: 15–25;
24. Abbott, J. A. and D. R. Massie. 1995. “*Nondestructive dynamic force deformation measurement of kiwifruit firmness (Actinidia deliciosa)*”. Trans. ASAE. 38: 1809–1812;
25. Mitsuru Taniwaki, Naoki Sakurai. “*Evaluation of the Internal Quality of Agricultural Products using Acoustic Vibration Techniques*”, J. Japan. Soc. Hort. Sci. 79(2) (2010): 113-128;
26. Abbott, J. A., G. S. Bachman, R. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik. 1968. “*Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables*”. Food Technol. 22: 101–112;
27. Piezoelectric transducers from Piezo Systems, Inc: <http://www.piezo.com/> ;

28. N. Muramatsu, N. Sakurai, R. Yamamoto, D.J. Nevins, T. Takahara, T. Ogata. “*Comparison of a non-destructive acoustic method with an intrusive method for firmness measurement of kiwifruit*”, *Postharvest Biology and Technology* 12(1997) 221-228;
29. Microchip Technology Inc: <http://www.microchip.com/> ;
Pic Microcontrollers, PIC - dsPIC Families, dsPIC Filter Design, Webinars, Components, Datasheets, Tutorials, Development Tools MPLAB C18 & C30, PICkit 3 In-Circuit Debugger, Code Samples;
30. Noliac Group, piezoelectric technology: <http://www.noliac.com/> ;
31. Mirza Avdic. “*Progetto di un sistema di pilotaggio per attuatori piezoelettrici*”,
Tesi di Laurea;
32. MATLAB: programming environment for algorithm development, data analysis, visualization, and numerical computation: <http://www.mathworks.com/> ;