

# **Università degli Studi di Padova**

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccatronica**

TESI DI LAUREA

## **Sviluppo di un sistema per la misura della posizione di una carica metallica all'interno di un crogiolo a levitazione**

Relatore: Ch.mo Prof. CHITARIN GIUSEPPE

Correlatore: Ing. RICCI ROBERTO

Laureando: BESCO ALESSANDRO

Anno Accademico 2013-2014



*Ai miei genitori, per la fiducia e la pazienza con cui hanno atteso questo giorno;  
ad Angelica, per l'amore e il sostegno che mi ha donato in questo cammino;  
a Gianluca, per i suoi fraterni e indispensabili insegnamenti;  
a mio figlio che ha dato un senso a questo traguardo.*



# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1 Elementi di acustica.....</b>	<b>3</b>
1.1 Generalità sulle onde .....	3
1.2 Il suono .....	5
1.2.1 Velocità del suono .....	6
1.2.2 Caratteristiche del suono e grandezze fondamentali.....	7
1.2.3 Impedenza acustica.....	8
1.2.4 Il Decibel.....	8
1.3 I limiti del suono: gli ultrasuoni .....	9
1.4 Propagazione delle onde sonore.....	9
1.4.1 Riflessione e rifrazione .....	9
1.4.2 Attenuazione del suono: assorbimento e diffusione .....	10
1.4.3 Gli eco: stima della distanza e fenomeni indesiderati.....	11
1.5 L'effetto Doppler.....	12
<b>CAPITOLO 2 Elementi di elettromagnetismo.....</b>	<b>13</b>
2.1 Elettrostatica: il campo elettrico.....	13
2.2 Magnetismo: il campo magnetico.....	14
2.2.1 Interazioni elettro-magnetiche.....	15
2.3 Le equazioni di Maxwell .....	16
2.4 Le correnti di Foucault.....	18
<b>CAPITOLO 3 Descrizione e principi di funzionamento del Crogiolo .....</b>	<b>19</b>
3.1 Sistema induttivo: la levitazione e fusione magnetica.....	19
3.1.1 Correnti indotte: Effetto pelle .....	19
3.1.2 Correnti indotte: Effetto Joule .....	20
3.1.3 Correnti indotte: Effetto meccanico .....	20
3.2 Il crogiolo .....	21
3.3 Sistema di alimentazione e circuito elettrico.....	22
3.3.1 Il circuito risonante RLC.....	23
3.4 Sistema idraulico: circuito di raffreddamento e per il vuoto.....	24
3.5 Strumenti di misurazione.....	25

<b>CAPITOLO 4 Descrizione dei dispositivi ad ultrasuoni .....</b>	<b>27</b>
4.1 Caratteristiche principali degli ultrasuoni .....	27
4.2 I sensori ad ultrasuoni .....	27
4.1.1 Struttura interna e caratteristiche elettriche.....	28
4.3 I circuiti elettrici Tx e Rx .....	30
4.4 Funzionamento globale del sistema .....	33
4.5 La scheda Arduino Mega .....	34
4.6 L'accelerometro .....	35
<b>CAPITOLO 5 Misure della dinamica del provino metallico .....</b>	<b>37</b>
5.1 Misure ed elaborazione dati .....	37
5.1.1 Collegamento della strumentazione .....	37
5.1.2 Rilevazioni effettuate.....	38
5.1.3 Modifica e sviluppo dei codici Matlab .....	39
5.2 Commenti e risultati .....	43
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>55</b>

# INTRODUZIONE

La conoscenza della dinamica di un metallo in fusione, sospeso all'interno di un crogiolo a levitazione magnetica, consente di stabilire come le forze generate da un campo elettromagnetico agiscono sul metallo stesso, variandone la forma e la posizione, e quindi indirizzarle in maniera sempre più precisa migliorando il processo di fusione e aumentando la stabilità del pezzo.

Questo elaborato descrive lo sviluppo iniziale di un sistema per la misura della dinamica di un provino metallico attraverso un dispositivo ad ultrasuoni. L'impossibilità di una misura a contatto con il metallo porta a ricercare sistemi di misura a distanza in grado di percepire movimenti di ridotta entità. In questo la scelta degli ultrasuoni garantisce la possibilità di una misura accurata in quanto, per le loro caratteristiche, gli ultrasuoni possono essere direzionati e collimati in fasci sottili che interessano un'area ristretta. Gli ostacoli, presenti nell'area dove l'onda ultrasonora incide, vengono localizzati attraverso il fenomeno della riflessione (detto volgarmente eco) ed è possibile stimarne la distanza e l'eventuale loro movimento.

Nel determinare la dinamica del metallo, il problema principale è dato dalla cospicua presenza di ostacoli oltre il provino stesso, che ne offuscano e mascherano la presenza. L'obiettivo dello studio è quello di effettuare delle acquisizioni delle onde ultrasonore riflesse, nei pressi del crogiolo a levitazione magnetica, in presenza e assenza del provino metallico, ed elaborare i segnali ottenuti eliminando gli ostacoli indesiderati, in modo da mantenere la sola informazione inerente il metallo in movimento.





## Elementi di acustica

### 1.1 Generalità sulle onde

[1][3][5]

Un'onda è una perturbazione che si origina in un punto nello spazio, e si propaga nel tempo attraverso un mezzo materiale o il vuoto, producendo un effetto in un altro punto. La propagazione implica un trasporto di energia, ma non di materia.

Ad esempio, un sasso, cadendo nell'acqua, genera dal punto d'ingresso delle onde circolari che si allargano verso l'esterno, nel tempo. Le molecole d'acqua si spostano di pochi centimetri, mentre l'onda si propaga in zone sempre più lontane da quella in cui è stata provocata la perturbazione, con un ritardo determinato dalla velocità di propagazione.

L'origine da cui nasce la perturbazione, che si muove nello spazio circostante, viene detta sorgente. Al variare di questa, variano l'onda e di conseguenza la perturbazione.

Una classificazione generale delle onde è da attribuirsi al mezzo di propagazione: si parla di onde meccaniche in un mezzo materiale, sia esso solido, liquido o gassoso, e di onde elettromagnetiche o radiazione elettromagnetica nel vuoto. Le onde stazionarie non si propagano nello spazio, ma sono causate da combinazioni di onde, come, ad esempio, il moto di una corda di chitarra. Tra le onde meccaniche si cita l'onda elastica, la cui propagazione è legata all'elasticità del mezzo materiale in cui ha origine. Il movimento ondulatorio può essere diviso in trasversale e longitudinale: nel primo caso, l'oscillazione delle particelle del mezzo è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda; nel secondo, è nella medesima direzione della propagazione.

Se un mezzo materiale viene posto in oscillazione in modo tale da ripetere periodicamente lo stesso movimento, in esso si genera un'onda periodica. Questa è caratterizzata da un periodo  $T$ , ovvero il tempo impiegato per compiere un'oscillazione completa, e da una frequenza  $f$ , inverso del periodo, che corrisponde al numero di ripetizioni nell'unità di tempo. Oltre le suddette, sono caratteristiche importanti del profilo d'onda anche la lunghezza d'onda e l'ampiezza.

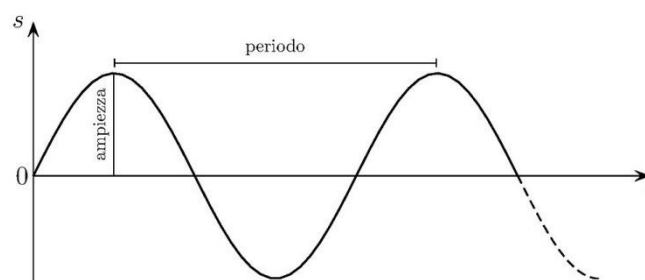


Figura 1 Onda sonora

Si consideri l'onda periodica classica e ideale, ovvero la funzione sinusoidale nello spazio e nel tempo:

$$\xi(x, t) = \xi_o \sin k(x - v_f t) = \xi_o \sin [k(x - v_f t) + 2\pi]$$

Se ad  $x$  si sostituisce  $x + \frac{2\pi}{k}$  la funzione  $\xi(x, t)$  assume lo stesso valore, ossia:

$$\begin{aligned} \xi\left(x + \frac{2\pi}{k}, t\right) &= \xi_o \sin k\left(x + \frac{2\pi}{k} - v_f t\right) = \xi_o \sin [k(x - v_f t) + 2\pi] = \xi_o \sin k(x - v_f t) \\ &= \xi(x, t) \end{aligned}$$

Si è dimostrato che il rapporto  $\lambda = \frac{2\pi}{k}$  [m] è il periodo di ripetizione spaziale, ovvero la curva si ripete ogni  $\lambda$ . Tale valore è detto lunghezza d'onda e corrisponde alla distanza tra due creste consecutive dell'onda, ovvero al percorso compiuto dall'onda in un periodo. L'ampiezza rappresentata da  $\xi_o$  è il valore di massimo scostamento dell'onda dalla posizione di equilibrio. La quantità  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  è chiamata numero d'onda e rappresenta il numero di lunghezze d'onda nella distanza  $2\pi$ . Sostituendola nell'espressione:

$$\xi(x, t) = \xi_o \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - v_f t)\right) = \xi_o \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi v_f}{\lambda}t\right) = \xi_o \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \omega t\right)$$

si ottiene la pulsazione angolare  $\omega = \frac{2\pi v_f}{\lambda} = 2\pi f$  [ $\frac{rad}{s}$ ], dove  $f$  indica la frequenza [Hertz] e  $v_f$  la velocità di fase, da cui  $\lambda f = v_f$  relazione tra lunghezza d'onda, frequenza e velocità di fase. Infine, se il periodo  $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$  [s], l'espressione che descrive il moto ondulatorio periodico di un'onda sinusoidale, che si muove nella direzione  $x$ , diventa:

$$\xi(x, t) = \xi_o \sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$$

Ciò evidenzia la presenza di due periodicità: una nel tempo, dovuta al periodo  $T$ , e una nello spazio, dovuta alla lunghezza d'onda  $\lambda$ . Queste sono legate da un rapporto di proporzionalità diretta:  $\frac{\lambda}{T} = v_f$  [ $\frac{m}{s}$ ].

La funzione  $\xi(x, t)$ , in campo acustico, descrive la propagazione di un'onda piana, in cui le grandezze variano in funzione del tempo e della coordinata cartesiana di propagazione, mentre assumono valori costanti, indipendenti da  $y$  e  $z$ , su piani

perpendicolari  $x$ . Sono di notevole importanza anche le onde sferiche, generate da una sorgente puntiforme, la cui direzione di propagazione è a simmetria radiale. In questo caso le grandezze acustiche dipendono dal tempo e dalla coordinata radiale, intesa come distanza dal centro di simmetria:

$$\xi(r, t) = \frac{\xi_0}{r} \sin 2\pi\left(\frac{r}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$$

Si nota che l'ampiezza delle onde sferiche, a differenza delle onde piane, non è costante, ma si attenua al crescere della distanza del fattore  $\frac{1}{r}$ .

## 1.2 Il suono

[2][5][6][7]

Le onde sonore sono costituite da onde elastiche, trasmesse attraverso mezzi elastici sottoposti a variazioni di pressione (compressioni e rarefazioni). La trasmissione sonora coinvolge una sorgente, un mezzo trasmissivo e un ricevitore. Il mezzo o corpo elastico, sia esso in forma solida, liquida o gassosa, è requisito indispensabile per la trasmissione sonora; infatti, nel vuoto la propagazione di onde meccanico-elastiche non è possibile. In particolare, al suo interno, le particelle propagano sequenzialmente tra loro il moto oscillatorio, attraverso uno spostamento locale attorno alla loro posizione di equilibrio. Per questo, il mezzo deve essere elastico e possedere inerzia: l'elasticità garantisce che la sollecitazione di una particella provochi una forza interna opposta che la riporti nella posizione di equilibrio, mentre l'inerzia, ovvero la massa, consente di trasferire quantità di moto. Solidi e fluidi possiedono tali caratteristiche, ma se i primi presentano sia elasticità di taglio che di compressione, i fluidi, in buona approssimazione, non presentano resistenza elastica alla deformazione di taglio, per cui possono propagare solo onde longitudinali. Un esempio classico è quello di una lamina elastica incernierata ad un'estremità e posta in vibrazione. La pressione dell'aria che la circonda è soggetta ad un continuo aumento e ad una successiva diminuzione. L'alternanza di compressioni e rarefazioni si propaga, nel tempo, verso posizioni distanti dalla lamina, con lunghezza d'onda tra due compressioni o rarefazioni consecutive pari a  $\lambda$ . L'aria è il corpo elastico entro cui le onde di pressione si muovono nella direzione di propagazione, grazie all'oscillazione delle particelle che la compongono, intorno al loro punto di equilibrio stabile. Al crescere della distanza dalla sorgente, l'ampiezza delle oscillazioni si attenua perché l'energia si distribuisce su una superficie più ampia. Il moto presenta una certa velocità finita che dipende dalle caratteristiche del mezzo.

Il moto delle onde sonore è funzione dello spazio e del tempo, per cui presenta una certa velocità. Questa non è costante, ma dipende dal mezzo trasmissivo e dalla temperatura. Ad esempio, in aria a pressione atmosferica e temperatura  $0^\circ\text{C}$ , il suono si propaga alla velocità  $c = 331,4 \text{ m/s}$ . Si consideri un gas all'interno di un condotto cilindrico di sezione  $S$  costante. In un lato del condotto sia posto un pistone con una corsa finita, mentre l'altra estremità sia libera. A seguito del movimento del pistone a velocità lineare  $v$  costante, la pressione nel condotto varia di una quantità  $\Delta p$ . Tale variazione si trasmette tra gli strati d'aria adiacenti attraverso onde longitudinali composte da compressioni (creste) e rarefazioni (avvallamenti). La condizione di equilibrio, a pistone fermo, presenta pressione  $p_o$ , temperatura  $T_o$  e densità  $\rho_o$ . Considerando un solo fronte d'onda, con velocità dovuta alla compressione  $c$  costante, si distinguono nel fluido due zone: una di equilibrio oltre il fronte, e una, prima del fronte, a pressione  $p_o + \Delta p$ , densità  $\rho_o + \Delta \rho$  e velocità  $v$ . Da una posizione solidale al fronte si osserva che il fluido passa da una velocità  $c$  a pressione  $p_o$  e densità  $\rho_o$  ad una velocità  $c - v$  a pressione  $p_o + \Delta p$  e densità  $\rho_o + \Delta \rho$ ; si può considerare il moto a regime permanente e applicare l'equazione di continuità dei fluidi (1) e quella della quantità di moto (2):

$$\rho_o S c = (\rho_o + \Delta \rho) S (c - v) \quad (1)$$

$$S[p_o - (p_o + \Delta p)] = \rho_o c S [(c - v) - c] \quad (2)$$

Le variazioni di pressione  $\Delta p$ , densità  $\Delta \rho$  e la velocità del pistone  $v$  possono ritenersi piccole rispetto alla pressione  $p_o$  e densità  $\rho_o$  di equilibrio, e alla velocità di compressione  $c$ , quindi semplificando:  $\Delta \rho = \rho_o \frac{v}{c}$  e  $\Delta p = \rho_o c v$ . La seconda rappresenta la legge di Ohm acustica e mostra la proporzionalità tra la pressione sonora e la velocità di oscillazione delle particelle. Sostituendola nell'equazione della quantità di moto, si ricava:  $c = \sqrt{\Delta p / \Delta \rho}$ .

Il moto del fronte d'onda dà luogo ad una trasformazione termodinamica, che si può presupporre adiabatica  $p v^k = \text{cost}$  considerando il gas ideale. La variazione di temperatura nel gas dipende dalla compressione e rarefazione causate dall'onda di pressione, e non dalla conduzione termica rispetto al gas adiacente. Il fronte può essere immaginato come una successione di celle adiabatiche rispetto a quelle precedenti e seguenti. Inoltre, essendo la variazione di pressione delle onde sonore trascurabile rispetto alla pressione atmosferica, la velocità di propagazione dell'onda si

può approssimare a quella di una perturbazione infinitesima. Tale si può considerare anche la trasformazione adiabatica del fronte d'onda e quindi ritenerla isoentropica, ossia reversibile. Se  $E_s = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s$  è il modulo di comprimibilità isoentropico di un fluido, ovvero l'incremento pressorio che causa una diminuzione volumetrica, dove  $v$  indica il volume specifico, si ottiene:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{\frac{E_s}{\rho}} \quad [m/s] .$$

Per i gas ideali si può scrivere  $E_s = kp$ , con  $k$  caratteristica del fluido particolare gas ideale (rapporto tra calori specifici), da cui  $c = \sqrt{kp v}$ .

In certe condizioni l'aria può essere considerata gas ideale, quindi vale la relazione appena ricavata. Sostituendo  $p v = RT$  e trasformando la temperatura da gradi Kelvin a gradi Celsius, si ricava  $c = 331,4 + 0,6t(^{\circ}C)$ , dove si nota la forte dipendenza della velocità del suono dalla temperatura .

### 1.2.2 Caratteristiche del suono e grandezze fondamentali

[2][5]

È importante distinguere il significato di suono da quello di rumore: il primo corrisponde ad un'onda sonora periodica, mentre il secondo ad un'onda sonora aperiodica. Gli elementi distintivi di un suono o di un rumore sono: l'acutezza, l'intensità e il timbro.

- L'acutezza è direttamente proporzionale alla frequenza: un suono grave presenta una frequenza di qualche decina di Hertz; uno acuto fino a qualche migliaia di Hertz.
- L'intensità è direttamente proporzionale alla pressione sonora; essa rappresenta l'ampiezza di oscillazione delle particelle del mezzo di propagazione; è elevata nei suoni forti, contenuta nei suoni deboli.
- Il timbro consente di distinguere suoni con medesima altezza ed intensità, ma provenienti da sorgenti diverse. È legato alla forma d'onda del suono.

Le grandezze fondamentali che definiscono un suono e lo caratterizzano dal punto di vista energetico sono: la pressione, la potenza, l'intensità sonora e la densità.

- La pressione sonora rappresenta, nel tempo, la variazione di pressione generata rispetto la condizione di quiete. Si definisce in valore efficace:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad [Pa] \quad ; \quad p_{eff} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{con andamento sinusoidale})$$

- La potenza sonora  $W$  riferita ad una sorgente corrisponde all'energia sonora totale emessa nell'unità di tempo. Si può esprimere in valor medio:  $W = \overline{p v S}$  [Watt].
- L'intensità sonora è la potenza trasmessa in una certa direzione attraverso un'area di sezione unitaria normale alla direzione stessa  $I = \frac{\partial W}{\partial S}$  [ $\frac{W}{m^2}$ ]. Ad esempio, nel caso di onde sferiche che si propagano da una sorgente puntiforme nello spazio libero vale  $I = \frac{W}{4\pi r^2}$ . Dalla legge di Ohm acustica è possibile ricavare l'espressione generale per le onde piane e quella per un campo acustico perfettamente diffuso, in cui l'energia sonora è distribuita uniformemente in tutte le direzioni; esse sono rispettivamente:  $I = \frac{p_{eff}^2}{\rho c}$ ,  $I = \frac{p_{eff}^2}{4\rho c}$ .
- La densità sonora è l'energia sonora inclusa in un volume unitario:  $D = \frac{p_{eff}^2}{\rho c^2}$  [ $\frac{W \cdot s}{m^3}$ ].

Si noti che, a parità di potenza, intensità e altezza sono inversamente proporzionali; infatti, è possibile emettere frequenze elevate con ampiezze contenute o viceversa. Tra pressione sonora e velocità  $c$  c'è una proporzionalità diretta (legge di Ohm acustica) e tale legame vale anche con l'ampiezza di oscillazione delle particelle del mezzo. Ampiezza e intensità sonora hanno legame quadratico, mentre ampiezza e distanza dalla sorgente sono inversamente proporzionali.

### 1.2.3 Impedenza acustica

[3][4]

L'impedenza acustica caratteristica è un parametro intrinseco del mezzo di propagazione. È definita dal rapporto tra la pressione sonora e la velocità di vibrazione delle particelle in un punto. Nel caso di onde piane si definisce come il prodotto tra la densità del mezzo e la velocità di propagazione dell'onda:  $Z = \rho c$  [ $\frac{Pa \cdot s}{m}$ ], mentre nel caso generale viene rappresentata come una grandezza complessa:  $Z = R + jX$ , dove  $R$  e  $X$  rappresentano rispettivamente la resistenza e la reattanza acustica specifica.

### 1.2.4 Il Decibel

[2]

Le grandezze caratteristiche del suono, vengono quantificate attraverso la scala logaritmica espressa in decibel, consentendo un confronto rispetto a valori assunti come riferimento e una compressione della scala dei valori che altrimenti risulterebbe di notevole estensione. Si definiscono, quindi, il livello di pressione sonora, di potenza sonora, d'intensità sonora:  $L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}$ ,  $L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}$ ,  $L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$  [dB]

### 1.3 I limiti del suono: gli ultrasuoni

[5][6]

Un'onda elastica non può essere direttamente associata ad un suono perché, essendo una percezione, il ricevente potrebbe non distinguerla. L'elemento discriminante è l'altezza (frequenza), ma vi è anche una dipendenza dall'intensità (pressione sonora di soglia), dal timbro (continuità dell'onda, sovrapposizione di altri suoni o di rumore) e dalla direzione di provenienza. Si definisce campo di udibilità l'intervallo di frequenze che l'orecchio umano è in grado di percepire, ossia da 16 a 20 KHz. Onde elastiche di frequenza inferiore vengono dette infrasuoni, mentre quelle a frequenze superiori ultrasuoni. Questi ultimi possono essere percepiti da alcuni animali, ma anche attraverso dispositivi elettronici: per questo il loro impiego è molto diffuso in ambito medico e industriale. Dal rapporto di proporzionalità  $\frac{\lambda}{T} = v$ , sostituendo al periodo la frequenza, si ricava che l'intervallo di lunghezze d'onda corrispondenti al campo di udibilità varia tra 20 e 0,016 m. Al crescere della frequenza si riduce la distanza tra una compressione e una rarefazione dell'onda, ovvero diminuisce  $\lambda$ . Lunghezze d'onda così contenute consentono di generare fasci di ultrasuoni sottili e collimati, che non subiscono diffrazione.

### 1.4 Propagazione delle onde sonore

[2][3][4]

Le onde sonore si propagano, in assenza di ostacoli, lontano dalla sorgente. Essendo ampiezza e distanza inversamente proporzionali, l'aumento di una provoca la diminuzione dell'altra; quindi, al crescere della distanza, la pressione sonora decresce, le onde divergono e l'ampiezza si riduce fino ad annullarsi. Oltre alla distanza, concorrono all'attenuazione sonora anche fattori atmosferici, ambientali e architettonici (barriere). Se la sorgente non è puntiforme, ma ha caratteristiche direzionali, ovvero il campo acustico non è perfettamente diffuso, la pressione sonora dell'onda ad una certa distanza dalla sorgente non è uniforme, ma varia a seconda della direzione. In funzione della direzione si definisce il fattore di direzionalità  $Q$  come il rapporto tra l'intensità sonora in un punto distante dalla sorgente e l'intensità sonora generata nello stesso punto da una sorgente che emette uniformemente. Ad esempio, una sorgente puntiforme in una superficie piana riflettente ha  $Q = 2$ ; si ottiene:  $I = \frac{WQ}{4\pi r^2} = \frac{W}{2\pi r^2}$ .

#### 1.4.1 Riflessione e rifrazione

[2][4][6][7]

La presenza di ostacoli lungo la direzione di propagazione del suono origina due fenomeni: la riflessione, ovvero la comparsa di un eco, e la trasmissione o rifrazione

dell'onda. Se la superficie dell'ostacolo è grande rispetto alla lunghezza d'onda, l'onda non lo supera: viene riflessa o dispersa in molte direzioni e si genera un'ombra sonora. Questi fenomeni dipendono dalle caratteristiche dell'onda incidente e dell'ostacolo, dall'angolo d'incidenza e dalle impedenze dei mezzi trasmissivi ( $Z_1$  e  $Z_2$ ). L'angolo di riflessione si ricava dalla legge di Snell:  $\frac{\text{sen } \vartheta_1}{\text{sen } \vartheta_2} = \frac{c_1}{c_2}$  ed è quello risultante con la normale alla superficie dell'onda incidente: si può immaginare l'onda riflessa come emessa da una sorgente immaginaria posta simmetricamente alla sorgente reale rispetto alla superficie riflettente. In caso di superficie curva, si distingue per quella concava una concentrazione delle onde riflesse, mentre per quella convessa una dispersione. La riflessione totale avviene in due casi: se la superficie è perfettamente rigida e impermeabile all'aria, e nel caso d'incidenza obliqua su una superficie di separazione di due mezzi differenti con angolo superiore ad un certo angolo limite. Se tali condizioni non sono verificate, parte dell'onda incidente viene assorbita, e in certi casi trasmessa oltre. Il fenomeno, chiamato rifrazione, modifica la direzione di propagazione dell'onda trasmessa, rispetto alla normale dell'onda incidente, di una quantità che dipende dalle velocità del suono nei due mezzi. È possibile quantificare l'entità di energia incidente che viene riflessa e trasmessa, per mezzo dei coefficienti di riflessione e trasmissione moltiplicati rispettivamente per l'energia totale incidente:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{coefficiente di riflessione}$$

$$t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad \text{coefficiente di trasmissione}$$

I due coefficienti sono legati tra loro in quanto, se la riflessione è totale, la trasmissione è nulla, e viceversa; vale dunque:  $r + t = 1$ .

#### 1.4.2 Attenuazione del suono: assorbimento e diffusione

[2][4][6][7]

L'attenuazione del suono è imputabile principalmente a due fenomeni: l'assorbimento e la diffusione. L'assorbimento dipende dalle caratteristiche termiche, elastiche e d'isteresi del mezzo di propagazione e provoca uno smorzamento del moto delle particelle del mezzo stesso. Infatti, la conduzione termica e la viscosità incidono negativamente sulla trasmissione energetica: il movimento molecolare, provocato dall'onda sonora nel propagarsi, viene ostacolato dalla viscosità e vi è una trasformazione di parte dell'energia, prodotta nel movimento, in calore. L'assorbimento entro un mezzo è quantificabile attraverso la seguente funzione esponenziale:  $I_x = I_0 e^{-\alpha x}$ . L'intensità sonora in funzione di  $x$  (spessore di penetrazione) decresce



esponenzialmente dal valore iniziale in funzione di un coefficiente di assorbimento  $\alpha$ , caratteristica del materiale particolare, con le dipendenze suddette. Gli elementi in grado di assorbire il suono sono detti a potere fonoassorbente. Quando la dimensione di una superficie di separazione tra due mezzi è pari o minore alla lunghezza d'onda, oppure la superficie medesima presenta delle irregolarità comparabili alla lunghezza d'onda, si incorre nel fenomeno della diffusione. Questo, contrariamente alla riflessione, provoca una dispersione dell'energia incidente in più direzioni, inoltre esso è causato dalla differenza d'impedenza acustica tra i due mezzi e dipende dalle caratteristiche della superficie, dalla lunghezza d'onda e dall'angolo d'incidenza.

I fenomeni legati alla propagazione e all'attenuazione non vanno considerati singolarmente, ma globalmente. Ad esempio, se un'onda sonora, nel propagarsi, incontra una superficie con un'irregolarità notevole, oppure un ostacolo rilevante, rispetto alla lunghezza d'onda, la diffusione si può considerare rifrazione, in quanto gran parte dell'onda incidente viene riflessa. Al contrario, se l'ostacolo ha dimensioni ridotte o se l'irregolarità è comparabile alla lunghezza d'onda, la diffusione va considerata come diffrazione.

#### 1.4.3 Gli eco: stima della distanza e fenomeni indesiderati

[2][5][6][7]

Grazie al fenomeno della riflessione e alla conoscenza della velocità del suono, è possibile stimare la distanza di un ostacolo. Si immagina una sorgente emittente verso una parete perfettamente rigida e impermeabile, posta ad una distanza  $d$  incognita. Quando un'onda sonora raggiunge l'ostacolo, questa viene riflessa totalmente, tornando verso la causa che l'ha generata nell'intervallo di tempo  $\Delta t = \frac{2d}{c}$ . Nel caso la parete si trovi a breve distanza dalla sorgente, l'eco causa un fenomeno solitamente indesiderato: il riverbero. Per percepire due suoni distinti, questi devono essere separati di un certo intervallo di tempo non minore di un decimo di secondo, in cui il suono percorre in aria 34 metri. Se l'ostacolo è collocato ad una distanza tale che il suono impiega più di un secondo per percorrerla due volte, l'eco percepito sarà chiaro e distinguibile; in caso contrario, si ha il fenomeno del riverbero, ovvero la sovrapposizione delle onde sonore, con conseguenze negative (interferenza) nel caso di ricombinazione in contro-fase tra onda emessa e riflessa, o positive (rinforzo dell'intensità della sorgente) nel caso di ricombinazione in fase.

## 1.5 L'effetto Doppler

[2][5]

Se una sorgente sonora e un ricevitore sono posti ad una distanza  $d$  costante, ed essi sono fermi, un suono emesso viene recepito alla medesima frequenza  $f_s = \frac{c}{\lambda}$ . Contrariamente, quando sorgente e ricevitore sono in moto relativo uno rispetto all'altro, lo stesso suono è soggetto ad un cambio di tonalità. Se il ricevitore si muove verso una sorgente ferma con moto rettilineo e velocità  $v_o$ , il numero di vibrazioni sonore percepite è maggiore rispetto a quelle ricevute da fermo nello stesso intervallo di tempo. Infatti, nel sistema di riferimento del ricevitore il suono si propaga a velocità  $c + v_o$ , la lunghezza d'onda rimane costante, perché non dipende dal moto del ricevitore, e la frequenza percepita è  $f_o = \frac{c+v_o}{\lambda}$ . Sostituendo  $\lambda = \frac{c}{f_s}$ , si ottiene  $f_o = f_s (1 + \frac{v_o}{c})$  che risulta maggiore di quella emessa dalla sorgente, da cui la percezione di un suono più acuto. Se il ricevitore si muove allontanandosi dalla sorgente, la frequenza percepita diventa  $f_o = f_s (1 - \frac{v_o}{c})$ , che risulta minore di quella emessa dalla sorgente, da cui la percezione di un suono più grave. Se la sorgente si muove verso il ricevitore fermo con moto rettilineo e velocità  $v_s$ , il suono nell'aria si propaga a velocità  $c - v_s$  e la lunghezza d'onda risulta  $\lambda = \frac{c-v_s}{f_s}$ . Al ricevitore, la lunghezza d'onda è la stessa, ma il suono è recepito a velocità  $c$  e la frequenza vale  $f_o = \frac{c}{\lambda}$ . Sostituendo  $f_o = f_s (\frac{c}{c-v_s})$ , risulta maggiore di quella emessa dalla sorgente, da cui la percezione di un suono più acuto.

Se la sorgente si muove allontanandosi dal ricevitore fermo, la frequenza percepita diventa  $f_o = f_s (\frac{c}{c+v_s})$ , che risulta minore di quella emessa dalla sorgente, da cui la percezione di un suono più grave. Infine, se sorgente e ricevitore si muovono contemporaneamente con velocità diverse, la frequenza percepita vale  $f_o = f_s (\frac{c-v_o}{c-v_s})$ , con  $v_o$  e  $v_s$  positivi se il verso di propagazione da sorgente a ricevitore è lo stesso, negativi contrariamente.

### Elementi di elettromagnetismo

L'elettromagnetismo è un ramo della fisica classica che si occupa di studiare la correlazione tra fenomeni elettrici e magnetici. In particolare, che:

- una corrente elettrica induce un campo magnetico;
- un conduttore immerso in un campo magnetico variabile viene indotto da una forza elettromotrice;
- un conduttore percorso da corrente immerso in un campo magnetico viene sottoposto ad una forza pondero motrice.

Tra i tanti che si occuparono di questi studi, va citato J.C. Maxwell, che elaborò una teoria seguita dalle ben note equazioni a lui intitolate, che riassumono fedelmente le leggi e i fenomeni suddetti.<sup>[12][18]</sup>

#### 2.1 Elettrostatica: il campo elettrico

[5][11]

L'elettricità (dal greco *elektron*, ambra) è un fenomeno, presente in natura, in grado di generare rilevanti interazioni tra corpi. Alcuni materiali hanno la capacità di elettrizzarsi, ovvero di assumere una certa quantità di carica elettrica (ioni). Questa si manifesta attraverso una forza elettrica, la cui esistenza è dimostrata dal fatto che due corpi elettrizzati, posti in vicinanza, possono respingersi o attrarsi a seconda che l'elettrizzazione sia la stessa o l'opposta. I due stati di elettrizzazione sono definiti come positivo e negativo; essi si originano grazie alla presenza di una carica elettrica, rispettivamente positiva (protone) o negativa (elettrone), in eccesso rispetto alle condizioni di equilibrio. Qualsiasi particella o porzione di materia è caratterizzata da una certa carica. Nella maggior parte dei casi quella positiva eguaglia quella negativa, per cui il corpo si dice elettricamente neutro. È possibile dimostrare che la carica elettrica sia una grandezza conservativa: in un sistema elettricamente isolato la carica totale rimane costante nel tempo. L'interazione elettrostatica tra due cariche ferme, poste ad una distanza  $d$ , corrisponde ad una forza agente su ciascuna carica e con direzione la congiungente delle due. È descritta dalla legge di Coulomb:  $F = k \frac{qq'}{d^2} [N]$ , dove  $qq'$  sono le cariche e  $k$  è una costante funzione delle unità di misura scelte (per la carica l'unità è il Coulomb  $[C]$ ) e del mezzo in cui giacciono le cariche, di norma un isolante detto dielettrico. Solitamente si definisce  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , con  $\epsilon_0 [\frac{C^2}{Nm^2}]$  costante dielettrica o permittività del vuoto. Con questa premessa è possibile definire il campo elettrostatico come la regione dello spazio entro cui una carica  $q_0$ , detta di prova, posta

in punto qualsiasi, è soggetta ad una forza elettrostatica risultante delle forze di altre cariche ferme all'interno della regione. L'insieme delle cariche rappresenta la sorgente del campo elettrostatico che, interagendo a distanza con la carica  $q_0$ , la sottopone ad una forza. L'intensità del campo elettrostatico è pari alla forza risultante sulla carica di prova, diviso la carica stessa:  $E = \frac{F}{q_0} \left[ \frac{N}{C} \right]$ . Scrivendo la formula come:  $F = q_0 E$  e sostituendola nella legge di Coulomb, si ricava:  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'}{d^2} \mathbf{u}'$  che rappresenta vettorialmente il campo elettrico generato da una carica  $q'$  in un punto a distanza  $d$  da essa. La forza sulla carica ha lo stesso verso (uscende) del campo se  $q$  è positiva, mentre ha verso opposto (entra) se  $q$  è negativa. La presenza di ioni positivi e negativi, in una regione sottoposta ad un campo elettrico, genera un effetto di polarizzazione, ovvero una separazione delle cariche opposte. In particolare, due cariche elettriche puntiformi di segno opposto distanti  $d$  danno luogo a un dipolo elettrico. Attraverso le linee di campo, tangenti alla direzione del campo elettrico in ogni suo punto, è possibile rappresentarne l'andamento. Tali linee sono anche dette "di forza" perché mostrano quale sarebbe il moto di una carica di prova positiva posta in un punto tangente alla linea; esse si originano dalle cariche positive e si chiudono in quelle negative. Il campo elettrostatico è un campo vettoriale: la somma vettoriale del campo prodotto singolarmente da più cariche origina un campo risultante.

## 2.2 Magnetismo: il campo magnetico

[5][11]

Un magnete (origine etimologica da *magnetite*: minerale molto diffuso in Magnèsia, antica città in Asia Minore) è un minerale ferroso in grado di attirare in alcune sue parti (poli) limature di ferro. Anche un materiale non magnetico, purché appartenente alle sostanze ferromagnetiche, può manifestare tale proprietà di attrazione se posto a contatto con della magnetite, originando in tal modo un magnete artificiale, anche detto calamita. Dalle osservazioni sperimentali è noto che, avvicinando due magneti, si origina tra i due un'interazione; dunque è possibile definire il campo magnetico come lo spazio attorno ad un magnete in cui si instaura una forza magnetica. Tale forza può essere attrattiva o repulsiva a seconda dei poli magnetici affacciati. I poli sono due: il nord (positivo) e il sud (negativo); segni uguali si respingono, segni opposti si attraggono. Ogni magnete è costituito da un dipolo magnetico di segni opposti e stessa intensità. Il campo magnetico  $B$  è vettoriale; si rappresenta con delle linee chiuse, tangenti in ogni punto al campo stesso, con verso dal polo sud al nord.

Tra campi elettrici e magnetici esistono alcune somiglianze, ma anche differenze sostanziali. Tuttavia, gli studi svolti da alcuni fisici nella storia, consentono di affermare che i due campi non sono fenomeni indipendenti, ma tra loro correlati: fu Oersted il primo a notare che un filo percorso da corrente produce nello spazio circostante un campo magnetico. In seguito, Faraday dimostrò che un filo percorso da corrente subisce una forza, quando immerso in un campo magnetico e, successivamente, che campi magnetici variabili nel tempo inducono campi elettrici. Maxwell dimostrò l'opposto. Infine, Ampère osservò che tra due fili paralleli percorsi da una corrente esiste una forza. Si può dunque concludere che un campo magnetico è il risultato dell'interazione di cariche elettriche in moto e che cariche elettriche in moto risentono di forze, dovute al campo magnetico. La forza magnetica o di Lorentz è quella che agisce su una particella di massa  $m$  e carica  $q$  in moto con velocità  $\mathbf{v}$  entro un campo magnetico  $\mathbf{B}$  (vettore):  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Essa è nulla quando la velocità è parallela al campo, massima quando è ortogonale. Va notato che la forza magnetica, ortogonale al campo  $\mathbf{B}$ , al contrario di quella elettrostatica, parallela al campo  $\mathbf{E}$ , non compie lavoro sulla particella: imprimendo un'accelerazione solo centripeta può variarne la direzione, ma non il modulo. Se la suddetta particella, oltre che a quello magnetico, è sottoposta anche ad un campo elettrico, la forza risultante su di essa sarà la somma di quella magnetica e quella elettrostatica. In questo caso il campo elettrostatico impone un'azione accelerante di tipo tangenziale, quello magnetico ancora centripeta deflettente. Si consideri un conduttore, con elettroni in moto grazie all'azione di un campo elettrico, immerso in un campo magnetico. Ogni elettrone è sottoposto alla forza di Lorentz, che viene trasmessa alla massa del conduttore stesso. Sommando l'effetto di ogni elettrone presente alla lunghezza del filo, si ricava la seconda legge elementare di Laplace:  $d\mathbf{F} = i d\mathbf{s} \times \mathbf{B}$ , che mostra come la forza magnetica su un tratto infinitesimo di filo, sia proporzionale alla corrente, e ortogonale al filo e al campo magnetico. Inoltre, dipende dalla lunghezza del filo, ma non dalla sua forma. L'intensità del campo magnetico, prodotto da un tratto infinitesimo di filo  $d\mathbf{s} = ds \mathbf{u}_t$  percorso da una corrente  $i$ , in un punto  $P$  a distanza  $r$ , si ricava dalla prima legge di Laplace:  $d\mathbf{B} = k_m \frac{id\mathbf{s}}{r^2} \mathbf{u}_t \times \mathbf{u}_r [T]$ , dove  $\mathbf{u}_r$  è il versore della direzione orientata dal filo al punto,  $\mathbf{u}_t$  è il versore tangente al filo,  $k_m = \frac{\mu_0}{4\pi} [\frac{H}{m}]$  è una costante che dipende dal sistema di unità di misura e dal mezzo materiale; in questo caso il vuoto, quindi  $\mu_0 [\frac{H}{m}]$ , è la permeabilità magnetica del vuoto. Come si può notare, il campo magnetico è proporzionale alla corrente, anche rispetto alla sua orientazione, e inversamente

proporzionale al quadrato della distanza. Nel caso di una carica in moto, il campo magnetico vale  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{qv \times \mathbf{u}_r}{r^2}$  e in generale per un circuito chiuso  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{s} \times \mathbf{u}_r}{r^2}$  (legge di Ampère-Laplace). Per completezza si citano anche le espressioni:

- \*  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \mathbf{u}_t \times \mathbf{u}_n$  legge di Biot-Savart per un filo rettilineo indefinito
- \*  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{r^3} (2\cos\theta \mathbf{u}_r + \sin\theta \mathbf{u}_\theta)$  campo magnetico per una spira qualunque
- \*  $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 Ni}{l} \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4R^2}}$  campo magnetico per un solenoide

## 2.3 Le equazioni di Maxwell

[11][16][17]

Da quanto descritto nei paragrafi precedenti, si può affermare che l'interazione elettromagnetica è collegata alla carica elettrica e può essere descritta attraverso la definizione di campo elettromagnetico. Questo è formato da due vettori, quello del campo elettrostatico e quello del campo magnetico; la somma delle rispettive forze su di una carica origina quella risultante dovuta al campo elettromagnetico:  $F = q(E + v \times B)$ . Entrambi i campi dipendono nello specifico dalla posizione e dal moto delle cariche che li generano, e sono legati tra loro da due leggi: Faraday-Henry e Ampère-Maxwell. Queste relazioni vengono esposte da quattro leggi, dette equazioni di Maxwell, che sintetizzano tutta la teoria delle interazioni elettromagnetiche. Definite la carica elettrica  $q$  e la corrente  $i$  come sorgenti del campo elettromagnetico, attraverso le equazioni si possono determinare i due campi: elettrico e magnetico. Le equazioni di Maxwell in forma integrale e differenziale sono:

- I. Legge di Gauss per il campo elettrico: *il flusso del campo elettrostatico  $E$  prodotto da un sistema di cariche attraverso una superficie chiusa è uguale alla somma algebrica delle cariche elettriche contenute all'interno della superficie, divisa per  $\epsilon_0$ .*

$$\oint \mathbf{E} \cdot \mathbf{u}_n d\Sigma = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

L'equazione mostra come sia possibile generare un campo elettrico con una singola carica, quindi la possibilità di separare le cariche positive da quelle negative, ovvero l'esistenza del monopolo elettrico.

- II. Legge di Gauss per il campo magnetico: *il flusso del campo magnetico  $B$  attraverso una superficie chiusa è sempre nullo.*

$$\oint \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_n d\Sigma = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

L'equazione mostra che la divergenza del campo magnetico è sempre nulla, ovvero le linee del campo magnetico sono sempre chiuse. Il campo magnetico, a differenza di quello elettrico, è solenoidale, per cui non può esistere il monopolo magnetico.

- III. Legge di Faraday-Henry: ogni qualvolta il flusso del campo magnetico concatenato con un circuito varia nel tempo si ha nel circuito una forza elettromotrice indotta data dall'opposto della derivata del flusso nel tempo.

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi(\mathbf{B})}{dt} \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

L'equazione mostra come la variazione nel tempo di un campo magnetico genera un campo elettrico.

- IV. Legge di Ampère-Maxwell: i campi magnetici sono prodotti sia dalle correnti di conduzioni che da variazioni temporali del campo elettrico.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \left( i + \varepsilon_0 \frac{d\Phi(\mathbf{E})}{dt} \right) \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right)$$

L'equazione mostra come un campo magnetico possa essere prodotto sia da una corrente che scorre in un conduttore, sia dalla variazione nel tempo di un campo elettrico.

Si osserva che le leggi di Gauss, inizialmente ricavate per i campi stazionari, restano valide anche se applicate a campi variabili nel tempo. Inoltre, si può notare che le quattro equazioni sono tra loro mutuamente coerenti. Nello spazio vuoto, in assenza di cariche e di correnti, le equazioni in forma differenziale mostrano una chiara simmetria:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Finora, nella trattazione, riferendosi al campo magnetico, si è inteso con  $\mathbf{B}$  il campo magnetico nel vuoto, anche chiamato vettore di induzione magnetica. Nel caso, invece, di un mezzo materiale, il vettore intensità del campo magnetico si indica con  $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$  con  $\mu$  permeabilità magnetica assoluta, pari al prodotto di quella relativa al vuoto del mezzo considerato e quella del vuoto stesso. Analoghe considerazioni valgono per il campo elettrico. In ogni caso le equazioni di Maxwell rimangono valide sia nel vuoto sia in altro mezzo materiale, sostituendo opportunamente le costanti di permeabilità magnetica e dielettrica.

## 2.4 Le correnti di Foucault

[11][18]

Si cita questo fenomeno fisico per la sua importanza nel funzionamento del sistema CCLM descritto nel capitolo successivo.

Se un conduttore metallico si muove all'interno di un campo magnetico costante o variabile, oppure è fermo entro un campo magnetico variabile, il campo elettrico indotto genera delle correnti che si concatenano con le linee del campo magnetico. Queste correnti parassite, dovute alla forza di Lorentz sugli elettroni, sono conseguenti alla variazione di flusso magnetico. Nel conduttore si genera una circolazione a vortice di elettroni, e quindi un campo magnetico opposto a quello che ha scatenato il fenomeno. Questi possono risultare tanto intensi da causare il riscaldamento del conduttore per effetto Joule, data l'elevata conducibilità del metallo, e una schermatura elettromagnetica che origina una forza levitante.



### Descrizione e principi di funzionamento del Crogiolo del DTG

Il funzionamento del crogiolo freddo a levitazione magnetica, in dotazione al laboratorio di elettrotecnica presso il “Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali DTG” dell’ “Università degli studi di Padova”, si basa sugli effetti delle correnti di Foucault, introdotte nel capitolo precedente. Descritto ampiamente e dettagliatamente in più articoli ed elaborati, viene qui ora brevemente riassunto per rendere completa la trattazione.

#### 3.1 Sistema induttivo: la levitazione e fusione magnetica [11][15][16][17]

L’induzione magnetica all’interno del crogiolo è ottenuta attraverso un sistema di dodici spire in rame isolate, avvolte a cono attorno allo stesso. Ulteriori due spire avvolte, in opposizione alle principali, alla sommità del crogiolo, annullano il campo magnetico in quella regione, migliorando la stabilità verticale del materiale da fondere. I conduttori, costituiti da tubi di rame di diametro 10 mm, consentono il deflusso del liquido refrigerante e su di essi scorre una corrente alternata, che genera un flusso magnetico variabile. Ponendo all’interno del crogiolo un oggetto metallico libero, vengono in esso indotte le correnti di Foucault in conseguenza della legge di Lenz: *l’effetto della forza elettromotrice indotta è sempre tale da opporsi alla causa che l’ha generata; pertanto la forza elettromotrice che si manifesta nel circuito è tale da produrre una corrente indotta i cui effetti magnetici si oppongono alle variazioni del flusso concatenato con il circuito stesso.* Le correnti indotte, costituite da un moto vorticoso delle cariche (elettroni) presenti in ogni punto del conduttore, originano a loro volta un campo magnetico opposto alla variazione del campo prodotto dalle spire. Questi fenomeni causano il riscaldamento fino alla fusione dell’oggetto metallico e la sua sospensione rispetto al crogiolo; essi dipendono dall’intensità e della frequenza del campo magnetico, dalla conducibilità e permeabilità magnetica dell’oggetto.

##### 3.1.1 Correnti indotte: Effetto pelle [15][16][17][18]

Una corrente alternata entro un conduttore non si distribuisce uniformemente, ma tende a concentrarsi lungo la sua superficie, provocando una resistenza maggiore soprattutto alle alte frequenze. Tale fenomeno, chiamato effetto pelle, decresce esponenzialmente più si penetra nel conduttore:  $J = J_0 e^{(-\frac{d}{\delta})} [A/m^2]$  , dove  $J$  rappresenta la densità di corrente alla profondità  $d$ ,  $J_0$  rappresenta la densità di

corrente sulla superficie e  $\delta$  rappresenta lo spessore di penetrazione. Quest'ultimo si può definire come:  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$  [m], dove si nota la dipendenza dalla conducibilità elettrica (funzione della temperatura) dalla permeabilità magnetica e dalla pulsazione del campo magnetico che provoca le correnti. L'incisività dell'effetto pelle in un qualsiasi materiale conduttore dipende anche dalla forma e dalle dimensioni; si definisce parametro di schermatura  $R_\omega = \mu\sigma\omega L^2 \approx (\frac{L}{\delta})^2$  la resistenza alla penetrazione della corrente. Se  $L$  è la dimensione principale del materiale (costante), più grande è la schermatura, più piccolo sarà lo spessore di penetrazione.

### 3.1.2 Correnti indotte: Effetto Joule

[15][16][17][18]

Qualsiasi materiale conduttore presenta un parametro caratteristico, funzione della temperatura, che quantifica l'opposizione al passaggio delle cariche elettriche: la resistività  $\rho$ . La resistenza è funzione, oltre a  $\rho$ , delle dimensioni caratteristiche del materiale. La circolazione di corrente produce, quindi, una generazione di calore quantificabile come potenza termica. Anche le correnti indotte, prodotte dal campo magnetico, producono tale effetto, in misura tale da provocare la fusione del metallo posto all'interno del crogiolo. È possibile valutare la potenza termica in termini di densità di corrente:  $P_j = \rho J^2$ , e considerando la distribuzione della corrente nel materiale:  $P_{jx} = P_{j0} e^{(\frac{-2x}{\delta})}$  [W].

### 3.1.3 Correnti indotte: Effetto meccanico

[13][14][15][16][17]

Un ulteriore effetto delle correnti indotte dal campo magnetico variabile delle spire è la comparsa della Forza di Lorentz descritta nel capitolo precedente, perpendicolare al verso della corrente indotta. Considerando la densità di corrente, la densità di forza magnetica per unità di volume è espressa dal prodotto vettoriale:  $\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$  [N]. Essendo i vettori  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{B}$  sinusoidali nel tempo, si può considerare l'equazione somma di un termine oscillante con valore medio diverso da zero, quando  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{B}$  sono temporalmente in fase, e un termine sinusoidale, con frequenza il doppio di quella dell'induttore, quando  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{B}$  sono temporalmente in quadratura di fase. Dei due, il secondo produce un effetto trascurabile rispetto al movimento, nel tempo, del metallo in fusione, quindi si considera solo l'effetto del primo. Sostituendo  $\mathbf{J}$  con la quarta equazione di Maxwell  $\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu} = \mathbf{J}$ , semplificata in quanto il campo elettrico è costante, si ricava:  $\mathbf{F} = (\nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu}) \times \mathbf{B}$ . Quest'ultima può essere separata in due parti:

$$\mathbf{F} = \left( \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu} \right) \times \mathbf{B} = \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \cdot \nabla \right) \mathbf{B} + \nabla \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \cdot \mathbf{B} \right) = \frac{1}{\mu} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \nabla \left( \frac{1}{\mu} |\mathbf{B}^2| \right) = \mathbf{F}_{rot} + \mathbf{F}_{irrot}$$

La prima parte  $\mathbf{F}_{rot}$ , detta componente rotazionale, provoca un rimescolamento interno del metallo fuso: lo stirring elettromagnetico, ossia un moto vorticoso e turbolento, causato da una distribuzione disomogenea che può variare la stabilità del metallo in fusione, la distribuzione della temperatura, la morfologia del pezzo solidificato. Essendo le correnti confinate dallo spessore di penetrazione, di conseguenza lo sono le forze  $\mathbf{F}_{rot}$  e  $\mathbf{F}_{irrot}$ . In particolare, l'entità dello stirring dipende anche dal parametro di schermatura: più esso è elevato, minore sarà il rimescolamento globale del fluido.

La seconda parte  $\mathbf{F}_{irrot}$ , detta componente non rotazionale, è la forza che produce la levitazione, attraverso la repulsione dovuta alle correnti indotte in opposizione sulle superfici del crogiolo e della massa fusa che possiede una certa densità e tensione superficiale. La componente non rotazionale equivale ad un gradiente pressorio che, oltre a contenere e modellare il fuso, insieme alla gravità e alle tensioni superficiali del metallo, si oppone alla pressione idrostatica del fluido (somma della pressione gravitazionale e quella relativa al fluido in fusione) e ne consente il sollevamento e la stabilizzazione. La parte più critica per l'equilibrio del metallo è quella inferiore nell'intorno dell'asse, dove la pressione idrostatica è più elevata; a causa della simmetria assiale del sistema, la densità di corrente e la pressione magnetica si annullano. Attraverso una particolare sagomatura del crogiolo, le linee di campo magnetico si comprimono e aumenta il gradiente di campo nell'intorno del punto critico, migliorando la stabilità. Infatti, se il volume a pressione magnetica nulla è molto piccolo, è sufficiente la tensione superficiale del fluido per sostenerlo. L'unico vincolo è la dimensione del pezzo da fondere che deve essere contenuta, ma sufficiente per le applicazioni sperimentali.

### 3.2 Il crogiolo

[13][14][15][16][17]

La struttura del crogiolo si compone di dieci elementi in rame ad alta conducibilità (oxygen-free), isolati e posizionati in modo da comporre una struttura conica, troncata nel fondo per consentire la colata. Ogni elemento è attraversato longitudinalmente da un canale interno per il passaggio del liquido refrigerante. È possibile dimostrare che l'intera struttura, oltre a contenere la massa da fondere, migliora la distribuzione delle linee del campo magnetico. La forma, la dimensione e la composizione ad elementi sono caratteristiche fondamentali per la levitazione e la stabilizzazione. In particolare, la forma conica permette di concentrare le forze alla base, dove il diametro delle spire è minore, quindi di agevolare la levitazione. Le dimensioni globali influenzano lo

spessore di penetrazione, mentre lo spessore degli elementi incide sulle forze magnetiche. Infine, la struttura a spicchi genera dei picchi di forza elettromagnetica nella discontinuità degli elementi e ciò instaura un'uniformità pressoria che migliora la stabilità. Il crogiolo ha un diametro superiore di 86 mm, inferiore di 10,6 mm e un'altezza di 52,7 mm. Le dieci sezioni da 36° contengono il canale variabile tra 4-6 mm in cui è saldo-brasato un tubo d'acciaio che si connette all'impianto di raffreddamento.

### 3.3 Sistema di alimentazione e circuito elettrico

[15][16][17]

L'alimentazione delle spire induttrici avviene per mezzo di un convertitore di frequenza ATE IFC-30, ideato per alimentare sistemi di riscaldamento a media frequenza attraverso un inverter a IGBT.

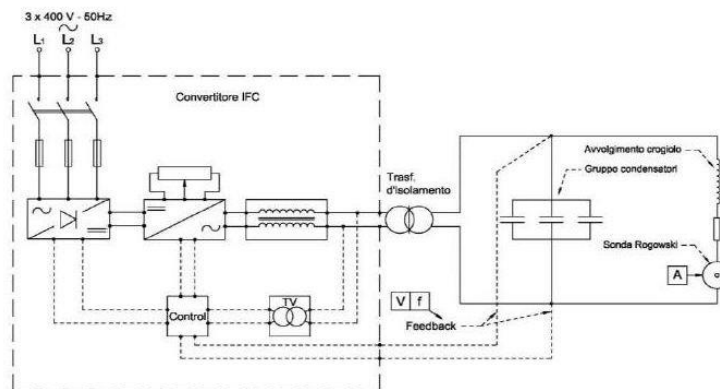


Figura 2 Schema elettrico

Le parti principali sono:

- un raddrizzatore AC/DC a ponte di Graetz collegato alla linea trifase;
- un inverter DC/AC a quattro coppie di IGBT per alimentare il circuito ad alta frequenza e la scheda di comando;
- un filtro RC, a banco di condensatori, atto a sopprimere eventuali sovratensioni;
- un'induttanza interna.

Attraverso opportune combinazioni di chiusura e apertura degli interruttori elettronici, si ottiene una corrente alternata a frequenza variabile per alimentare il carico. L'induttanza interna costituita da un nucleo ferromagnetico regolabile mediante prese interne, influenza la frequenza di risonanza del carico e protegge il convertitore dai cortocircuiti, limitando la corrente. È presente anche un sistema di controllo delle potenze collegato al raddrizzatore e all'inverter, che verifica i valori di tensione all'uscita dell'induttanza interna, per mezzo di un trasformatore, e ai capi del carico, garantendo protezione all'interno sistema.

Il convertitore ha i seguenti dati di targa:

- Potenza nominale: 30 KW
- Tensione del convertitore: 400V
- Campo di frequenza di lavoro: 4-25KHz

Il circuito elettrico del crogiolo è RLC. La serie resistenza-induttanza rappresenta le spire avvolte attorno il crogiolo, ovvero il carico, mentre il banco condensatori, in parallelo al crogiolo, è dimensionato per ottenere la frequenza di risonanza desiderata, da impostare sul convertitore. La risonanza consente l'amplificazione della corrente prodotta dal generatore di un fattore 5-15 e quindi di quelle parassite, con conseguente aumento dell'effetto di levitazione e riscaldamento del pezzo metallico. Tra alimentatore e crogiolo, un trasformatore di isolamento 1:1 separa i due sistemi; infine sul ramo dell'avvolgimento è posta una sonda Rogowski per la misura della corrente circolante.

### 3.3.1 Il circuito risonante RLC

[18]

Trasformando il ramo serie RL del crogiolo nel circuito RL parallelo, di impedenza equivalente, si perviene ad un circuito RLC parallelo. Dunque è possibile affermare che il funzionamento del crogiolo in parallelo al banco condensatori è simile a quello di un circuito risonante RLC parallelo.

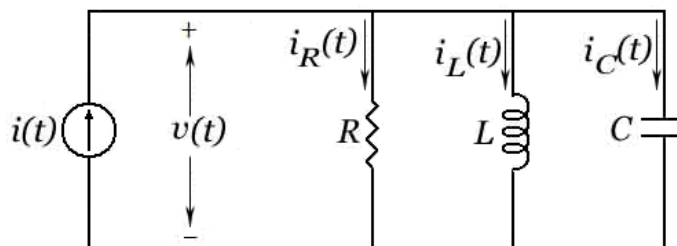


Figura 3 Circuito RLC parallelo

Applicando la legge di Kirchhoff per le correnti dei tre rami, l'ammettanza complessiva risulta:

$$Y(j\omega) = \frac{I}{V} = \frac{1}{R} - \frac{1}{j\omega L} + j\omega C = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \text{ [Siemens] .}$$

La condizione di risonanza necessita che tensione e corrente siano in fase tra loro. Ciò avviene quando la parte immaginaria dell'ammettanza è nulla, ovvero per  $\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = 0$ , ove le due reattanze sono uguali in modulo, ma in opposizione di fase. In tal caso

l'impedenza è minima e puramente resistiva: il generatore vede come carico la sola resistenza; la tensione applicata è massima e conseguentemente anche la corrente sugli avvolgimenti aumenta.

### 3.4 Sistema idraulico: circuito di raffreddamento e per il vuoto [16][17]

Date le notevoli potenze in gioco e la conseguente produzione calorica, si rende necessario attenuare le temperature del crogiolo, del circuito induttore e dell'alimentatore.

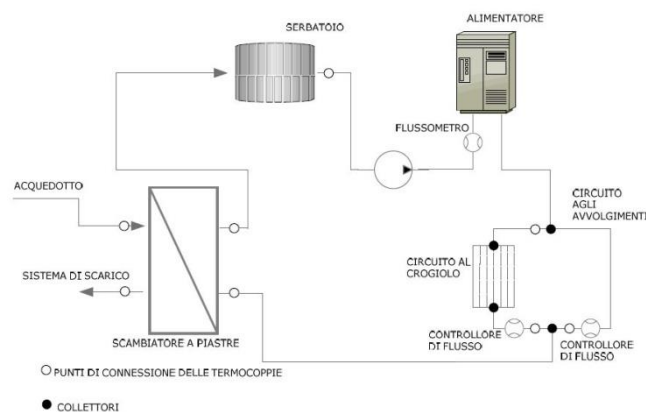


Figura 4 Impianto idraulico

L'elemento principale del circuito di raffreddamento è uno scambiatore a piastre liquido-liquido (Cipriani 30 KW). Il fluido caldo proveniente dagli elementi di potenza entra nello scambiatore, cede calore al fluido freddo proveniente dal sistema idrico e, una volta raffreddato, entra in un serbatoio di accumulo da 50 litri. Da questo, attraverso un pompa centrifuga monogirante (Lowara Cea 70/5A; portata d'acqua di esercizio 14 lit/min), viene pompato, passando per un filtro, verso il convertitore e parallelamente al crogiolo e gli avvolgimenti. Ogni sezione del crogiolo deve essere attraversata dal fluido, quindi si rende necessaria una suddivisione di quest'ultimo attraverso due collettori, uno di ingresso e uno d'uscita. La suddivisione prevede la serie di due settori, ovvero l'alternanza tra una sezione calda e una fredda. Il monitoraggio delle temperatura del fluido nei vari punti del circuito avviene per mezzo di nove termocoppie posizionate all'ingresso e all'uscita dei fluidi nello scambiatore, all'uscita del serbatoio, all'ingresso e all'uscita del collettore delle sezioni del crogiolo e dopo l'avvolgimento induttore. È presente anche un flussometro che abilita l'alimentatore per un valore di portata superiore ai 10/12 lit/min.

Il crogiolo può essere chiuso da una camera stagna in acciaio inox, che permette la fusione del metallo in vuoto o in atmosfera controllata. La rarefazione è ottenuta

attraverso una pompa rotativa ad olio (Edwards E2M12) in grado di portare la pressione fino a  $10^{-2}$  mbar. È possibile raggiungere valori di pressione inferiori, fino a  $10^{-4}$  mbar, attraverso una pompa turbo molecolare (Pfeiffer TPH240), che necessita del collegamento al circuito di raffreddamento. La misura di pressione avviene attraverso un sensore (Pfeiffer PKR 251), alloggiato nella camera stagna e collegato ad un'unità di controllo (TGP 261), che utilizza due metodi di misura: il Pirani e il "Cold Cathode".

### **3.5 Strumenti di misurazione**

[15][16][17]

Oltre alle temperature e alla pressione, è necessario conoscere i valori istantanei di tensione, corrente, frequenza e potenza. Per mezzo di un display, il convertitore IFC fornisce una lettura dei parametri elettrici applicati al circuito. Con l'ausilio di un oscilloscopio si visualizzano le misure di tensione e corrente sull'avvolgimento induttore. In particolare, la tensione viene misurata attraverso una sonda per misure differenziali di tensione: non è possibile una misura diretta, in quanto l'avvolgimento non possiede un riferimento di massa e la tensione su di esso è molto elevata. La sonda misura la differenza di potenziale tra due punti del circuito, fornendo in uscita una tensione riferita a massa con un fattore di riduzione 1:200. La corrente viene misurata attraverso una sonda Rogowski, ossia un conduttore avvolto su di un supporto circolare non ferroso, che avendo un valore d'induttanza contenuto, risulta efficiente nelle misure di corrente ad alta frequenza. Per la legge di Ampère, la tensione indotta ai capi della bobina è proporzionale alla derivata nel tempo della corrente misurata, ovvero all'intensità e alla frequenza della corrente. A monte della connessione con l'oscilloscopio viene inserito un filtro RC, calibrato in base alla frequenza, per attenuare i disturbi generati dai picchi della corrente. Infine, tutti i segnali provenienti dalle sonde e dalle termocoppie vengono interfacciati con un elaboratore, attraverso un'unità di acquisizione (Agilent HP 34970A), per essere visualizzati e memorizzati da un software dedicato.





### Descrizione dei dispositivi ad ultrasuoni

Nel seguente capitolo viene illustrato il sistema trasmissivo-ricettivo ad ultrasuoni utilizzato nella misura della dinamica del provino metallico sito all'interno del crogiolo descritto nel precedente capitolo. Il sistema è stato sviluppato nel laboratorio integrato di mecatronica presso il "Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali DTG" dell' "Università degli studi di Padova".

#### 4.1 Caratteristiche principali degli ultrasuoni

[8]

Gli ultrasuoni sono onde sonore a frequenze superiori i 20 KHz, quindi esterne al campo dell'udibilità. Essi sono caratterizzati da proprietà specifiche:

- La velocità di propagazione è proporzionale al prodotto della frequenza per la lunghezza d'onda, ed è fortemente dipendente dalla temperatura. In aria, alla temperatura di 20°C, il valore è relativamente contenuto (circa 344 m/s) e dà luogo a lunghezze d'onda corte che consentono un'elevata direzionalità e una buona risoluzione, ottenendo accurate misure della distanza. Per questi motivi, i dispositivi ad ultrasuoni possono emettere accuratamente radiazioni pur avendo dimensioni ridotte.
- Le onde ultrasoniche si riflettono su molti oggetti, consentendo di rilevarne la presenza. La rilevazione risulta complessa nei materiali a forte potere assorbente e in quelli con superfici irregolari soggette al fenomeno della diffusione.
- L'intensità delle onde in aria si attenua al crescere della distanza a causa delle perdite per diffusione (diffrazione) e assorbimento nel mezzo di propagazione. Al crescere della frequenza, aumenta l'attenuazione e si riduce la distanza raggiungibile.

#### 4.2 I sensori ad ultrasuoni

[8]

I sensori ultrasonori impiegati nelle schede di trasmissione e ricezione sono dispositivi piezoceramici che consentono la trasmissione di onde ultrasoniche nell'aria e la rilevazione delle onde riflesse da un oggetto. La generazione di onde ultrasoniche avviene attraverso un trasduttore atto a convertire segnali elettrici in oscillazioni meccaniche, ad una certa frequenza, che si propagano nel mezzo a cui il trasduttore è accoppiato. Vale anche l'opposto, in quanto un'onda che raggiunge il trasduttore, configurato come ricevitore, lo pone in vibrazione, generando un segnale elettrico. Tra i

fenomeni fisici che consentono tale conversione si citano la piezoelettricità e la ferroelettricità. La piezoelettricità è una caratteristica di alcuni cristalli: in seguito ad una sollecitazione di natura elastica, questi si polarizzano elettricamente. Sulle facce in cui viene applicata la forza di compressione e decompressione compaiono delle cariche di segno opposto, come per un condensatore, quindi tra esse è presente una differenza di potenziale proporzionale alla deformazione meccanica subita. È possibile anche la trasformazione inversa: applicando un campo elettrico al cristallo, questo si deforma elasticamente. Il fenomeno si origina perché in una cella cristallina di un dielettrico sono presenti molti dipoli, privi di un centro di simmetria, che, se non sono sottoposti a forze esterne, danno un effetto complessivo nullo. Ogni cristallo presenta una frequenza di oscillazione caratteristica, che dipende dal suo spessore; quando viene applicata una tensione oscillante o una deformazione variabile nel tempo, alla frequenza caratteristica, il cristallo si trova in condizione di risonanza, dove le vibrazioni sono massime. Simile al fenomeno appena descritto, la ferroelettricità è una caratteristica dei materiali piezoceramici, ovvero piastrine ceramiche polarizzate attraverso un campo elettrico statico, che mantengono la polarizzazione anche in assenza di quest'ultimo. L'applicazione di un campo elettrico genera deformazioni meccaniche del materiale, e quindi onde, o viceversa vibrazioni meccaniche inducono un campo elettrico. Anche in questo caso esiste una frequenza di oscillazione caratteristica, funzione dello spessore del materiale.

#### 4.1.1 Struttura interna e caratteristiche elettriche

[8]

La struttura interna dei sensori è un multivibratore, fissato elasticamente alla base, composto da un elemento risonatore e da un vibratore. Quest'ultimo è formato da un foglio metallico e da un foglio piezoelettrico ceramico; il risonatore ha forma conica per ottimizzare l'irradiazione e per concentrare le onde ricevute nella parte centrale del vibratore.

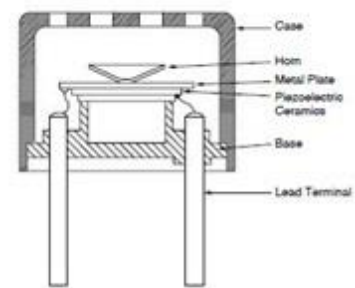


Figura 5 Struttura interna del sensore

I principali parametri elettrici sono:

- Il livello di pressione sonora indica il volume del suono. Si può esprimere in scala logaritmica:  $S.P.L. = 20 \log \frac{P}{P_0} [dB]$ , dove  $P$  è la pressione sonora del sensore in Pascal, mentre  $P_0$  è il riferimento di pressione sonora ( $20 \mu Pa$ ).
- La sensibilità indica il livello di ricezione sonora. Si può esprimere in scala logaritmica:  $S = 20 \log \frac{S}{S_0} [dB]$ , dove  $S$  è la tensione del sensore in Volt, mentre  $S_0$  è il riferimento di pressione sonora (V/Pa).

- Per la radiazione si definisce frontalmente al sensore l'angolo in cui il livello di pressione sonora (o la sensibilità) si attenua di 6dB. Questo è detto "angolo di metà attenuazione" ed ha un'espressione di  $\theta^{1/2}$ .

Si elencano di seguito le caratteristiche elettriche dei sensori MA40S4R/S, dove R indica il ricevitore ed S il trasmettitore:

Item	Part Number	MA40S4R/S
Construction		Open structure type
Using Method		Receiver and Transmitter (Dual use) type
Nominal Frequency (kHz)		40
Overall Sensitivity (dB)		-
Sensitivity (dB)		-63±3
Sound Pressure (dB)		120±3
Directivity (deg)		80
Capacitance (pF)		2550±20%
Operating Temperature Range (°C)		-40 - +85
Detectable Range (m)		0.2 - 4
Dimension (mm)		ø9.9×7.1h
Weight (g)		0.7
Max. Input Voltage		20 Vp-p Square wave 40kHz

Figura 6 Caratteristiche elettriche

Si mostrano, inoltre, gli andamenti della sensibilità, della pressione sonora e della radiazione caratteristica:

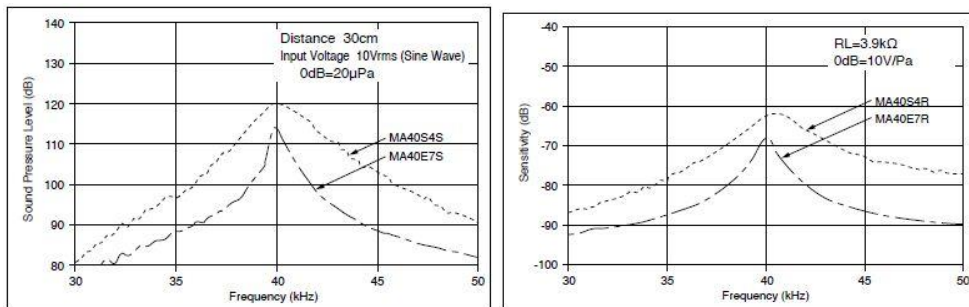


Figura 7 Sensibilità e pressione sonora

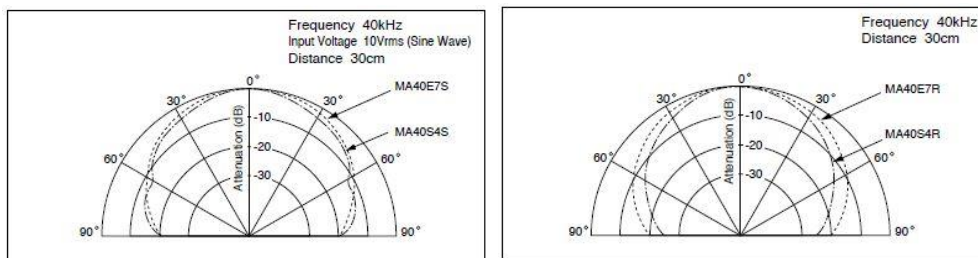


Figura 8 Radiazione caratteristica trasmettitore e ricevitore

### 4.3 I circuiti elettrici Tx e Rx

[18]

Trasmettitore e ricevitore ultrasonico costituiscono due circuiti elettrici separati, posizionati a breve distanza in modo che il segnale trasmesso e quello di eco siano sullo stesso asse. L'alimentazione proviene da un alimentatore "Gw Instek GPS-4303" che fornisce una tensione di 15 V al trasmettitore, e una tensione duale -12V, +12V al ricevitore. Lo schema elettrico del circuito di trasmissione Tx è il seguente:

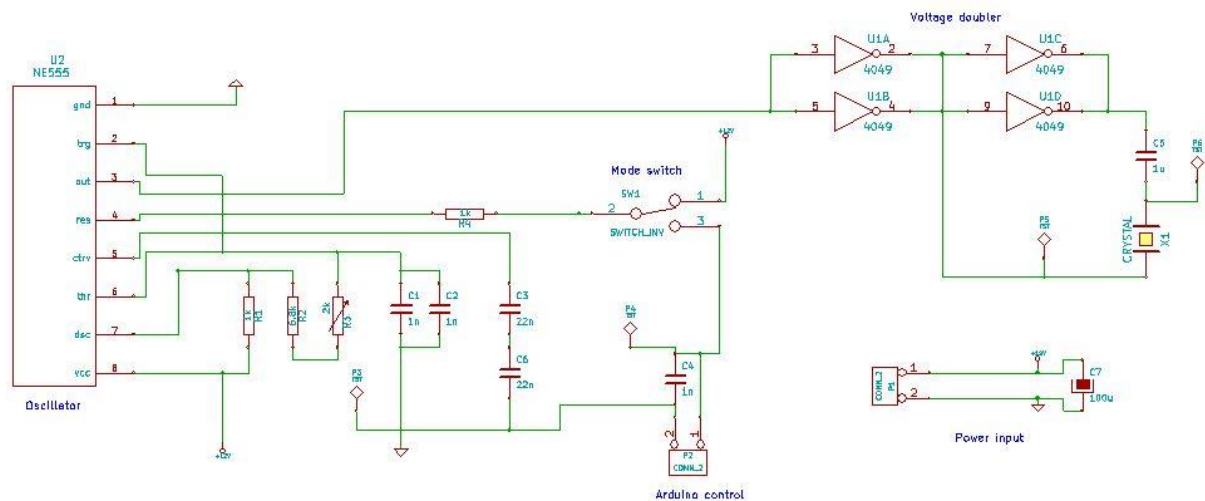


Figura 9 Schema elettrico scheda Tx

La parte circuitale a sinistra del "Mode switch" rappresenta una configurazione astabile del multivibratore a circuito integrato NE555, ovvero un oscillatore ad una frequenza di circa 40 KHz. Lo switch serve a selezionare la modalità di reset, che può essere standard a "Vcc" oppure comandata attraverso un ulteriore circuito elettrico, detto Arduino. La parte circuitale a destra del "Mode switch" è costituita da una configurazione a porte CMOS di un buffer invertente che funge da duplicatore di tensione: il segnale 0÷12 V proveniente dall'uscita del NE555 subisce una doppia inversione che genera, ai capi della serie sensore piezoelettrico e condensatore di disaccoppiamento per la continua, una tensione alternata a valor medio nullo di 24 Vpp.

Un multivibratore è un circuito impiegato per generare forme d'onda non sinusoidali, costituito da due amplificatori invertenti collegati in modo che l'uscita di uno sia l'ingresso dell'altro, con interposta una rete di accoppiamento. L'insieme origina una reazione positiva e, a seconda della configurazione, si ottiene un circuito monostabile (timer), bistabile (flip-flop), oppure astabile (oscillatore). L'intergrato NE555 è composto da un partitore resistivo con tre resistenze uguali, due comparatori, un latch RS, uno

stadio d'uscita e un transistor di scarica T. Attraverso il partitore resistivo, la tensione applicata all'ingresso invertente del primo comparatore vale  $\frac{2}{3}V_{CC}$ , mentre quella applicata all'ingresso non invertente del secondo comparatore vale  $\frac{V_{CC}}{3}$ . Se la tensione di trigger (TRIG) è minore di  $\frac{V_{CC}}{3}$ , l'uscita del secondo comparatore è alta, come l'ingresso del latch ( $S = 1$ ); anche l'uscita (OUT) è alta e il transistor è interdetto. Ciò rimane invariato anche se TRIG torna maggiore di  $\frac{V_{CC}}{3}$ , finché la tensione all'ingresso THRES è minore di  $\frac{2}{3}V_{CC}$ . Quando quest'ultima condizione non è verificata, il primo comparatore presenta uscita alta, il latch viene resettato ( $R = 1$ ), l'uscita (OUT) è bassa e il transistor satura. Ciò rimane invariato finché THRES è maggiore di  $\frac{2}{3}V_{CC}$ . Infine, l'ingresso control voltage (CONT) consente di variare la tensione all'ingresso non invertente del primo comparatore, mentre il reset negato resetta il latch indipendentemente dagli ingressi forzando l'uscita a zero.

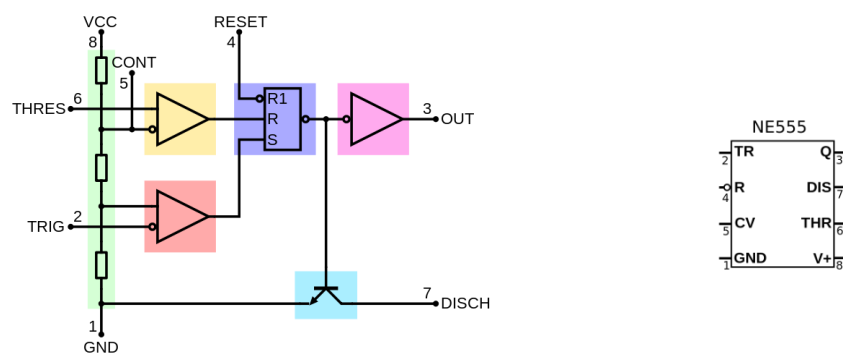


Figura 10 Circuito integrato NE555

Nella configurazione astabile, usata nel trasmettitore, lo schema circuitale è il seguente:

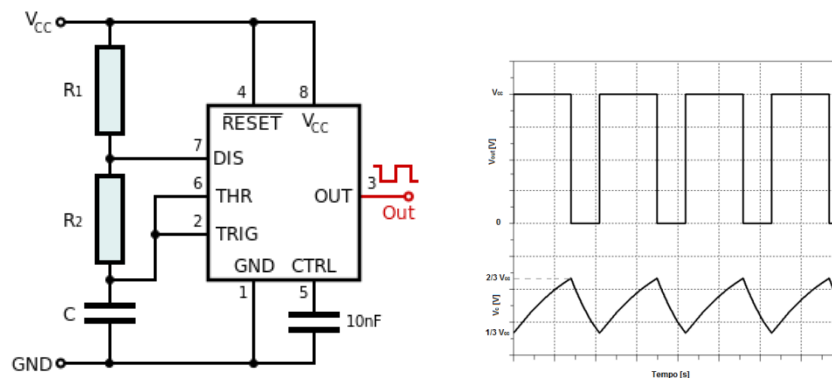


Figura 11 Configurazione astabile

Attraverso il partitore  $R_1$ ,  $R_2$  il condensatore si carica fino alla tensione  $\frac{2}{3}V_{cc}$ . A tale valore il latch viene resettato e l'uscita diviene bassa. Il transistor di scarica è in saturazione e il condensatore inizia a scaricarsi sulla resistenza  $R_2$ , attraverso il pin 7 a cui è collegato il transistor. La scarica prosegue fino al valore di  $\frac{V_{cc}}{3}$ , per il quale il latch viene settato, l'uscita torna alta e il transistor viene aperto. Ha, quindi, inizio una nuova fase di carica. Gli intervalli di carica e scarica sono quantificabili attraverso le equazioni di carica e scarica del condensatore:

$$T_1 = (R_1 + R_2)C \cdot \ln 2 \quad (\text{tempo di carica del condensatore})$$

$$T_2 = R_2C \cdot \ln 2 \quad (\text{tempo di scarica del condensatore})$$

L'uscita del circuito, nel periodo  $T = T_1 + T_2$ , oscilla tra 0 e  $V_{cc}$  con un duty cycle  $\delta =$

$$\frac{T_1}{T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}.$$

Lo schema elettrico del circuito di ricezione Rx è il seguente:

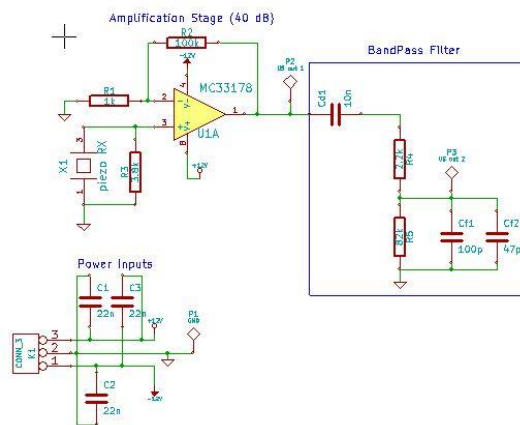


Figura 12 Schema elettrico scheda Rx

Il circuito ricevitore è essenzialmente composto da due parti: uno stadio amplificatore di 40 dB, composto da un operazionale duale in configurazione non invertente, e un filtro passa banda. L'operazionale riceve all'ingresso 3 una tensione proporzionale alle vibrazioni, indotte dalle onde ultrasonore, del sensore piezoelettrico. La resistenza R3 ha una funzione stabilizzatrice e di protezione. Dal valore delle resistenze R1 e R2 e attraverso la nota equazione che lega ingresso e uscita, si ricava il guadagno del blocco:  $A_v^{dB} = 20 \log \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 40 \text{ dB}$ . Il filtro passa banda presenta un condensatore serie per il disaccoppiamento della corrente continua e due condensatori paralleli che

alle alte frequenze sono approssimabili da un cortocircuito. La funzione di trasferimento del filtro è:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{P3}{P2} = \frac{j\omega C_{d1}R_5}{[1 + j\omega(C_{d1}R_4 + C_{d1}R_5 + C_{ftot}R_5) - \omega^2 C_{ftot}C_{d1}R_4R_5]}$$

Le sezioni “Power input” della scheda trasmissione e ricezione sono composte da alcuni condensatori che servono a stabilizzare la tensione d’ingresso.

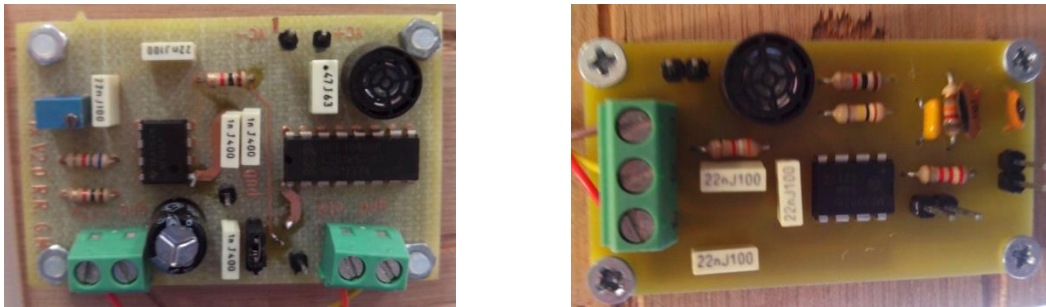


Figura 13 Le schede Tx e Rx

#### 4.4 Funzionamento globale del sistema

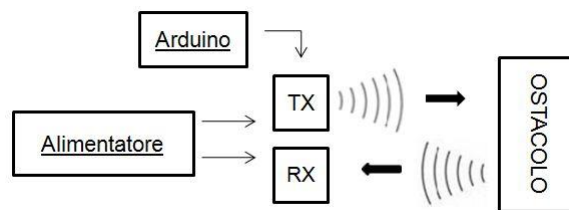


Figura 14 Schema a blocchi principio di funzionamento

Quando le schede sono alimentate, l’oscillatore presente nel trasmettitore produce un segnale onda quadra di ampiezza 12 V e frequenza intorno ai 40 KHz; infatti, a seconda del valore della resistenza variabile R3 della scheda Tx, il periodo  $T = T_1 + T_2$  cambia. In assenza del comando di reset, il treno d’onde quadre è continuo e, attraverso il duplicatore di tensione, giunge al sensore piezoelettrico, ponendolo in vibrazione alla frequenza suddetta. Le onde sonore generate viaggiano nel mezzo trasmissivo (aria) alla velocità del suono a temperatura ambiente, finché non incontrano un ostacolo. All’accadere di ciò, esse subiscono gli effetti descritti nel primo capitolo di questo elaborato, e vengono perciò in parte riflesse, tornando verso la causa che le ha generate. Vengono, quindi, recepite dal sensore piezoelettrico della scheda di ricezione, che, vibrando, produce ai suoi capi una tensione che viene

amplificata in ampiezza e filtrata in frequenza. Con tale funzionamento, vengono prodotte onde sonore sovrapposte che rendono impossibile la localizzazione corretta degli ostacoli. Per questo motivo, si configura un comando di reset cadenzato che origina una trasmissione impulsata: dopo l'emissione di poche onde, l'uscita dell'oscillatore viene disabilitata per un tempo sufficiente all'onda sonora per essere trasmessa e, se riflessa da un ostacolo, ricevuta nel suo eco. Il comando del reset è gestito dalla scheda Arduino, attraverso un contatore analogico, programmato per consentire la trasmissione dell'uscita dell'oscillatore per 100  $\mu$ s e disabilitarla per i successivi 10 ms.

#### 4.5 La scheda Arduino Mega

[9]

Arduino è una scheda elettronica di prototipazione, programmabile, ad elevata flessibilità hardware e software. Consente il comando e il controllo di sensori e attuatori, nonché la comunicazione con altri dispositivi. La piattaforma hardware è composta principalmente da un microcontrollore ATmega 1280 a 8 bit collegato alle porte I/O, da un oscillatore a cristallo a 16 Mhz e da un'interfaccia USB per la connessione ad un PC. Il microcontrollore possiede una memoria flash di 128 KB per la memorizzazione del codice software, una SRAM di 8 KB e una EEPROM di 4 KB. La sezione I/O comprende 54 pin digitali a 5 volt con una corrente massima di 40 mA, 16 ingressi analogici con una risoluzione a 10 bit e 4 porte hardware seriali. La programmazione del microcontrollore avviene per mezzo del protocollo ISP, dopo l'implementazione del codice in un ambiente di sviluppo integrato IDE, grazie ad un linguaggio dedicato derivato dal C++.

##### Caratteristiche principali:

- Microcontrollore: ATmega1280
- Tensione di funzionamento: 5V
- Alimentazione (raccomandata): 7-12V
- Alimentazione (limite): 6-20V
- Pin I/O digitali: 54 (di cui 15 abilitati per uscita PWM )
- Pin d'ingresso analogici 16
- Corrente DC per pin I/O 40 mA
- Memoria flash 128 KB
- SRAM 8 KB
- EEPROM 4 KB
- Velocità di clock 16 MHz



Figura 15 Arduino Mega



## 4.6 L'accelerometro

[10]

Per una controprova dei risultati forniti dal sensore ad ultrasuoni, viene posto sul provino metallico un accelerometro 3 assi, che fornisce una misura dell'accelerazione durante il moto del provino. Il sensore low-g "Freescale MMA7361L" è un accelerometro capacitivo di peso e dimensioni ridotte con uscite analogiche e sensibilità regolabile ( $\pm 1,5g$  o  $\pm 6g$ ). La scheda comprende una sezione per il condizionamento del segnale, un filtro passa basso ad un polo, una compensazione in temperatura.



## CAPITOLO 5

### Misure della dinamica del provino metallico

Vengono di seguito descritte le misure della dinamica del provino metallico effettuate attraverso il dispositivo ad ultrasuoni e l'accelerometro. Le misure sono state effettuate con il provino in movimento in prossimità o all'interno del crogiolo. L'accelerometro è stato introdotto con lo scopo di ottenere una verifica indipendente della posizione del provino. I dati dei due sistemi di misura sono stati elaborati mediante due codici sviluppati nell'ambiente di calcolo numerico Matlab. Considerando che la sperimentazione in oggetto è nelle fasi iniziali, le rilevazioni effettuate in quattro prove successive hanno consentito di affinare la tecnica ottenendo risultati soddisfacenti. La fase di elaborazione è risultata fondamentale per il progredire della sperimentazione, in quanto, solo attraverso l'analisi dei dati raccolti, è stato possibile riconoscere e risolvere via via le problematiche che impedivano l'ottenimento di risultati sufficientemente precisi. Per comprendere e verificare i risultati ottenuti, diventa fondamentale l'elaborazione numerica supportata dalle conoscenze acquisite.

#### 5.1 Misure ed elaborazione dati

##### 5.1.1 Collegamento della strumentazione

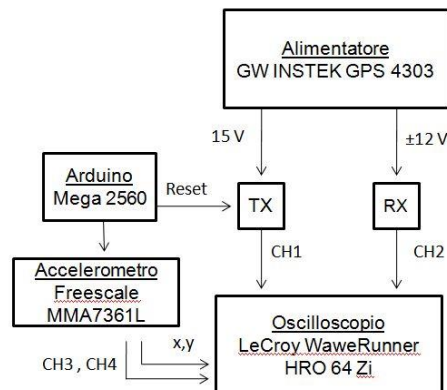


Figura 16 Schema a blocchi collegamento strumenti

Lo schema a blocchi rappresenta il collegamento finale adottato per le misurazioni; infatti, inizialmente non era presente l'accelerometro. L'alimentatore fornisce al connettore "P1" della scheda Tx una tensione di 15 V a 20 mA, mentre al connettore "K1" della scheda Rx una tensione duale  $\pm 12$  V a 250 mA. Arduino viene alimentato da una tensione continua di circa 7 V, è collegato allo switch "SW1" della scheda Tx per

comandare il reset dell'oscillatore, e alimenta a sua volta l'accelerometro. Le sonde di misura con riferimento a massa (0 V) sono collegate agli ingressi dell'oscilloscopio:

- CH1 è collegato al pin "P6" della scheda Tx, ovvero ai capi del sensore di trasmissione;
- CH2 è collegato al pin "P3" della scheda Rx, ovvero all'uscita del filtro passa banda;
- CH3 è collegato al pin "X" dell'accelerometro;
- CH4 è collegato al pin "Y" dell'accelerometro.

### 5.1.2 Rilevazioni effettuate

Le rilevazioni sono effettuate per mezzo di un oscilloscopio ad una frequenza di campionamento di 500 kS/s, per una durata di 5 s. Il provino metallico viene messo in movimento (in oscillazione naturale o forzata) sospeso da un filo, ed è posto sopra al crogiolo (nelle prove iniziali), e dentro il crogiolo (nelle prove successive). In tutte queste prove, il crogiolo a levitazione non è in funzione, ma la sua presenza è fondamentale per verificare l'affidabilità del sistema di misura. Ogni componente del crogiolo, infatti, rappresenta un ostacolo, e produce, in molteplici direzioni, eco inevitabilmente sovrapposti, rendendo di fatto difficoltoso rilevare la presenza del metallo nel suo moto contenuto dovuto alle forze magnetiche. Gli obiettivi principali sono, dunque, verificare che il sistema sappia determinare la posizione del provino, fermo e in moto, nonostante l'entità degli echi dovuti alla presenza del crogiolo.

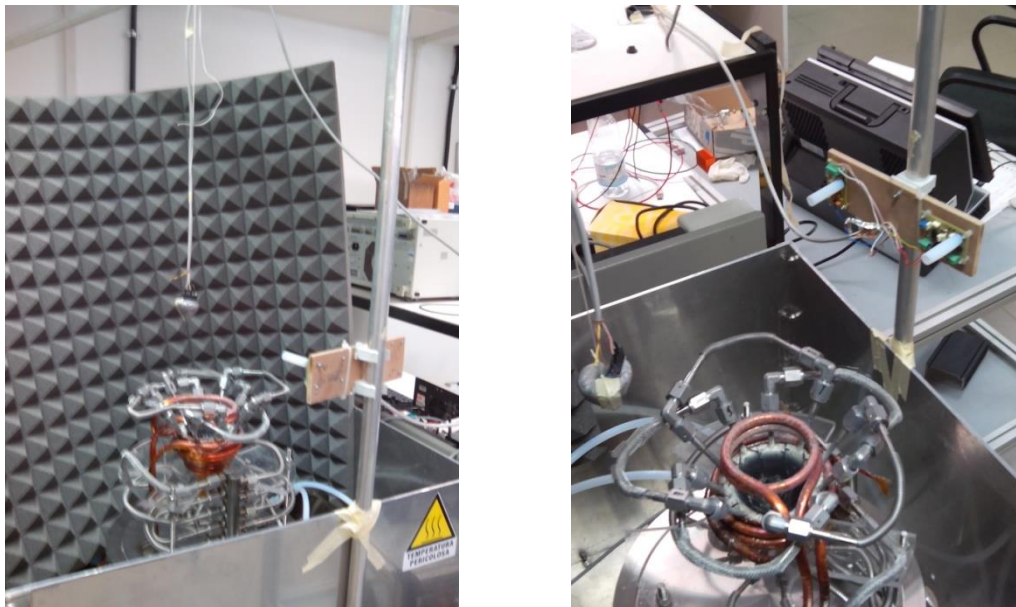


Figura 17 Postazione di rilevazione

Intorno al crogiolo è posto un pannello fonoassorbente per assorbire le onde ultrasonore che non incidono sul provino ed evitare che altri ostacoli presenti nelle vicinanze producano ulteriori riflessioni difficili da controllare. Le schede di trasmissione e ricezione sono alloggiare su di un'asta di cui si può variare l'altezza e l'inclinazione rispetto al crogiolo. L'accelerometro è invece incollato al provino metallico.

Si elencano di seguito le rilevazioni effettuate:

- senza provino e sensori alti rispetto il crogiolo;
- con provino fermo e sensori alti rispetto il crogiolo;
- con provino in oscillazione naturale e sensori alti rispetto il crogiolo;
- senza provino e sensori puntati verso il crogiolo;
- con provino in oscillazione naturale e sensori puntati verso il crogiolo;
- con provino e accelerometro in oscillazione naturale, sensori alti rispetto il crogiolo;
- con provino e accelerometro in oscillazione forzata, sensori alti rispetto il crogiolo;
- con provino e accelerometro in oscillazione forzata, sensori puntati verso il crogiolo;
- senza provino e sensori alti, inclinati verso il crogiolo;
- con provino e accelerometro in oscillazione forzata, sensori alti, inclinati verso il crogiolo.

Tutte le misure elencate vengono salvate in alcuni pacchetti dati, compatibili con il software Matlab. Ogni pacchetto contiene  $n^{\circ} = \frac{f_c}{t_{tot.}} = 2.500.000$  campioni discreti, che in Matlab vengono caricati in un vettore a cui è possibile operare elaborazioni.

### 5.1.3 Modifica e sviluppo dei codici Matlab

Il codice Matlab, inizialmente sviluppato presso il laboratorio integrato di mecatronica, ha lo scopo di stimare la distanza del provino metallico, utilizzando i dati sulle forme d'onda acquisite e quelli temporali impostati. Il codice può essere così riassunto: i dati acquisiti vengono caricati in due vettori, uno per il segnale di trasmissione e uno per quello ricevuto. Si definisce il vettore dei tempi dividendo la lunghezza totale dei vettori caricati per il valore impostato della frequenza di campionamento. Il segnale di trasmissione viene squadrato in modo da determinare l'istante iniziale e finale di ogni impulso di trasmissione (100  $\mu$ s). Si ricava, quindi, l'involuppo del segnale ricevuto applicando ad esso la funzione di Hilbert. Attraverso un ciclo "for" viene ricercato, per ogni impulso di trasmissione, l'istante di massimo immediatamente successivo

nell'involuppo del segnale ricevuto. La ricerca viene fatta entro un periodo temporale in cui si considera probabile la ricezione, data la posizione approssimativa del provino.

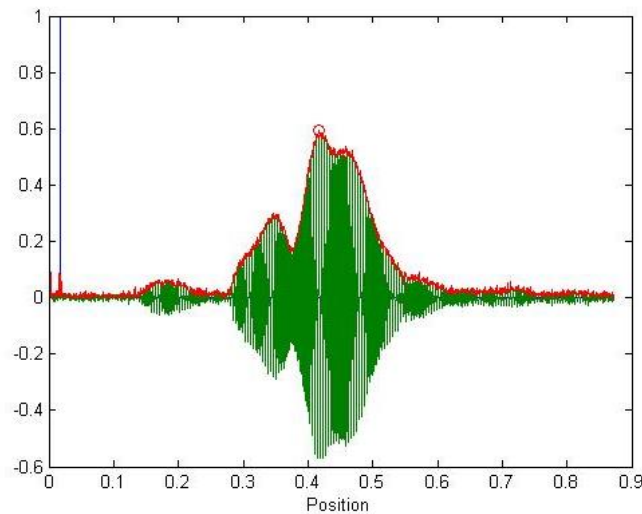


Figura 18 Impulso trasmesso e involuppo ricevuto con indicazione del massimo

La figura mostra il plottaggio di un impulso (blu) e l'eco ricevuto (verde) con relativo involuppo (rosso). Il cerchio rosso indica il valore massimo determinato per quell'eco, nonché la sua posizione stimata. Durante la visualizzazione in tempo reale, l'involuppo continua a variare a causa del rumore di fondo, della sovrapposizione degli eco dovuti ad altri ostacoli e, se presente, dell'oscillazione del provino nello spazio. L'intervallo di tempo tra inizio della trasmissione e massimo della ricezione, determinato in tal modo, moltiplicato per la velocità del suono (dimezzata, considerando l'andata e il ritorno dell'onda sonora), consente di ricavare la stima della distanza. Questa risulta imprecisa a causa dei fenomeni indesiderati appena citati e necessita di un filtraggio eseguito mediando in tre intervalli successivi i campioni del vettore del segnale distanza. Le modifiche apportate al codice hanno come obiettivo la sottrazione del rumore di fondo generato dalle parti componenti il crogiolo e dagli oggetti posti nelle vicinanze del sensore. Per questo motivo sono state eseguite delle rilevazioni senza provino nelle stesse condizioni al contorno di quelle con la presenza del provino. Caricando nell'esecuzione del codice entrambe le misure:

```
filenameRx = 'C1lev00001.dat'; % dati ricevuti con provino
filenameTx = 'C2lev00001.dat'; % dati trasmessi con provino
filenameRx0 = 'C1lev00002.dat'; % dati ricevuti senza provino
filenameTx0 = 'C2lev00002.dat'; % dati trasmessi senza provino

stx = load(filenameTx); % caricamento dati
srx = load(filenameRx); % "
stx0 = load(filenameTx0); % "
srx0 = load(filenameRx0); % "
```

si è eseguita la sottrazione, sottraendo elemento per elemento dal vettore del segnale con il provino presente quello del segnale in assenza del provino:

```
srxdiff = srx-srx0; % vettore differenza
```

Successivamente si è eseguita la medesima sottrazione tra i rispettivi vettori dopo l'applicazione della funzione di Hilbert:

```
srx0_inv = abs(hilbert(srx0)); % vettore inviluppo a vuoto  
srx_inv = abs(hilbert(srx)); % vettore inviluppo con provino  
srxdiff = srx_inv-srx0_inv; % vettore differenza
```

Per l'analisi dei segnali di accelerazione, acquisiti nelle direzioni x e y, è stato sviluppato un ulteriore codice Matlab. Le acquisizioni di 5 s vengono caricate in due vettori, adeguate al fattore di scala del sensore e tagliate nei loro campioni iniziali soggetti a imperfezioni dovute al troncamento; subiscono, quindi, una doppia integrazione discreta per ottenere l'andamento nello spazio. L'integrazione viene eseguita attraverso un ciclo "for" dividendo ogni elemento del vettore per la frequenza di campionamento e sommando tutti i risultati. Ai segnali di partenza e dopo ogni integrazione, viene tolto l'eventuale trend attraverso una specifica funzione presente in Matlab. Infine, si calcola il modulo dei due segnali di posizione determinati e si somma l'offset esistente tra i sensori e il provino per poter confrontare i risultati ottenuti con quelli forniti dal codice di stima della distanza. Si riporta di seguito il codice appena illustrato:

```
% Codice per misura traiettoria dell'oggetto in levitazione  
% NO clc, clear all, close all, PER CONFRONTO CON CODICE DISTANZA  
% Caricamento dei dati  
current_dir = cd;  
data_dir = './2014-05-22 Misure';  
cd(data_dir)  
filenameX = 'C3lev00004.dat';  
filenameY = 'C4lev00004.dat';  
axo = load(filenameX);  
ayo = load(filenameY);  
cd(current_dir);  
  
% Fattore di scala  
fs = 0.0815; % V/(m/s^2) fattore di scala  
axfs = axo/fs;  
ayfs = ayo/fs;  
  
% Eliminazione campioni iniziali e finali e detrend accelerazione  
start = 500000;  
stop = 2000000;  
atx = axfs(start:stop);  
aty = ayfs(start:stop);  
ax = detrend(atx);  
ay = detrend(aty);
```

```

% Definizione del vettore dei tempi e del segnale
Fs = 500e3;
Ts = 1/Fs;
Lx = length(ax);
Ly = length(ay);
tx = (0:1/Fs:(Lx-1)*1/Fs)';
ty = (0:1/Fs:(Ly-1)*1/Fs)';
figure
plot(tx, ax)
plot(ty, ay)

% Doppia integrazione X
vtx = zeros(Lx,1);
vtx(1) = ax(1)*Ts;
for i=2:Lx
    vtx(i) = vtx(i-1) + ax(i)*Ts;
end
figure
plot(tx, vtx)
vx = detrend(vtx);
plot(tx, vx)

stx = zeros(Lx,1);
stx(1) = vx(1)*Ts;
for i=2:Lx
    stx(i) = stx(i-1) + vx(i)*Ts;
end
plot(tx, stx)
sx = detrend(stx);
plot(tx, sx)

% Doppia integrazione Y
vty = zeros(Ly,1);
vty(1) = ay(1)*Ts;
for i=2:Ly
    vty(i) = vty(i-1) + ay(i)*Ts;
end
figure
plot(ty, vty)
vy = detrend(vty);
plot(ty, vy)
sty = zeros(Ly,1);
sty(1) = vy(1)*Ts;
for i=2:Ly
    sty(i) = sty(i-1) + vy(i)*Ts;
end
plot(ty, sty)
sy = detrend(sty);
plot(ty, sy)

% Modulo
offdist = #valore; % offset: distanza provino
dai sensori
modxy = sqrt(power(sx,2)+power(sy,2));
modxy = modxy + offdist;
figure(5)
plot(tx, modxy, 'r')
title('Module position')
xlabel('Time')
ylabel('Module')

```



## 5.2 Commenti e risultati

L'entità del segnale riflesso dal crogiolo rispetto a quello riflesso dal provino causa la presenza di un "rumore di fondo" che concorre alla produzione di onde ultrasonore riflesse e che deve essere eliminato per poter riconoscere la posizione del provino. A questo scopo si effettua la sottrazione tra il segnale in presenza del provino e quella in sua assenza. Infatti, quando il crogiolo è in funzione, il provino metallico in levitazione presenta un moto di ampiezza dell'ordine di pochi millimetri. Per questo è necessario che i sensori dispongano di un'elevata sensibilità nel distinguere il movimento e non vengano influenzati dalla presenza del crogiolo e di altri oggetti ad esso attigui.

Nei primi tentativi di sottrazione, ovvero eseguendo la differenza elemento per elemento del vettore con provino e quello senza, si è riscontrato come la forma d'onda del segnale differenza risultasse incongruente, in quanto il suo andamento cresceva nelle fasi finali dell'acquisizione.

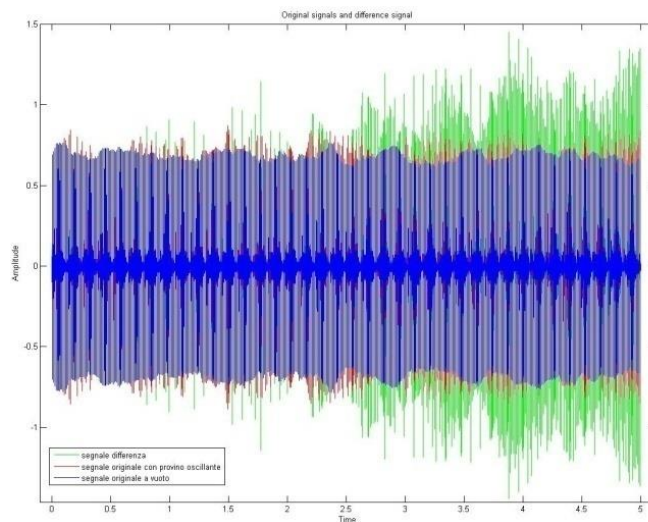


Figura 19 Effetto dello sfasamento sulla sottrazione

Essendo le rilevazioni, con e senza provino, effettuate in momenti diversi, si è attribuita la causa di tale fenomeno ad una scarsa ripetitività dei segnali trasmessi; infatti, si è notato che, nei 5 secondi totali di rilevazione, si manifesta uno sfasamento tra i segnali trasmessi che aumenta al crescere del tempo, con conseguenti effetti sui segnali ricevuti, cosicché il segnale ottenuto per sottrazione dei segnali ricevuti risulta valido inizialmente e scorretto in seguito.

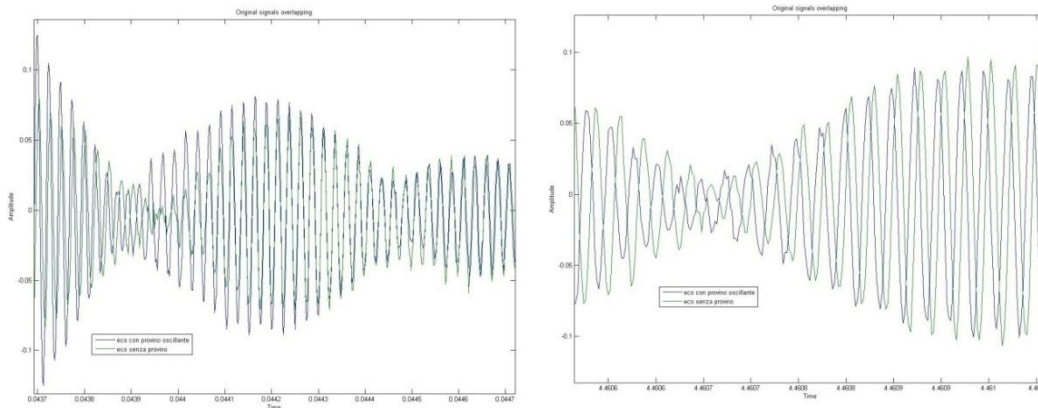


Figura 20 Sfasamento iniziale e finale dei segnali acquisiti

Per ovviare il problema dello sfasamento, una soluzione possibile è quella di eseguire la sottrazione tra l'involuppo dei rispettivi segnali trasmessi; quest'ultimo rappresenta la curva che congiunge tangenzialmente tutti i picchi di un'oscillazione modulata in ampiezza, e non dipende direttamente dalla fase del segnale. Utilizzando un tale accorgimento, il segnale ottenuto risulta più congruente alle aspettative; infatti, una parte consistente dei picchi dovuti alla riflessione degli oggetti indesiderati viene attenuata, ma nel complesso esso rimane molto instabile e altalenante.

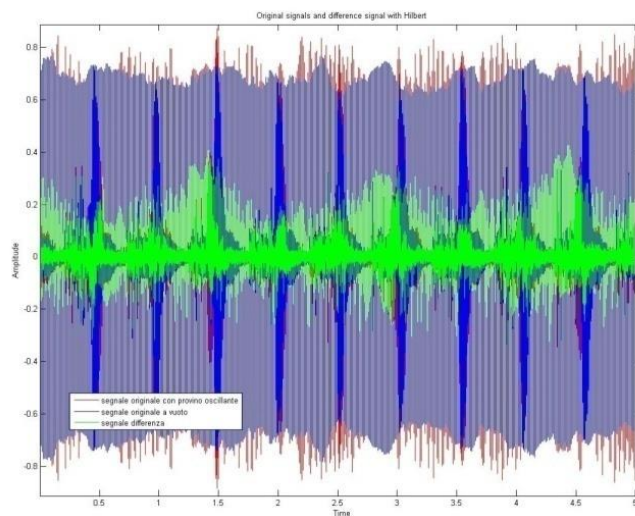


Figura 21 Effetto della sottrazione applicando Hilbert

Nel proseguo delle rilevazioni si è notato che il segnale trasmesso era affetto da un jitter provocato dalla scheda Arduino, a cui sono imputabili le problematiche precedentemente esposte. Un jitter è un disturbo dovuto a problemi di sincronismo, si manifesta come la variazione di una o più caratteristiche di un segnale e si definisce come l'ampiezza della deviazione massima nel tempo che esso subisce. Si è osservato che tale fenomeno avviene con una certa periodicità; come si può notare

dalle seguenti visualizzazioni, l'ultima onda quadra delle totali emesse nei 100  $\mu$ s di trasmissione visualizzata in istanti successivi, a parità d'impostazioni dello strumento di misura, inizia nello stesso punto, ma termina in punti differenti.

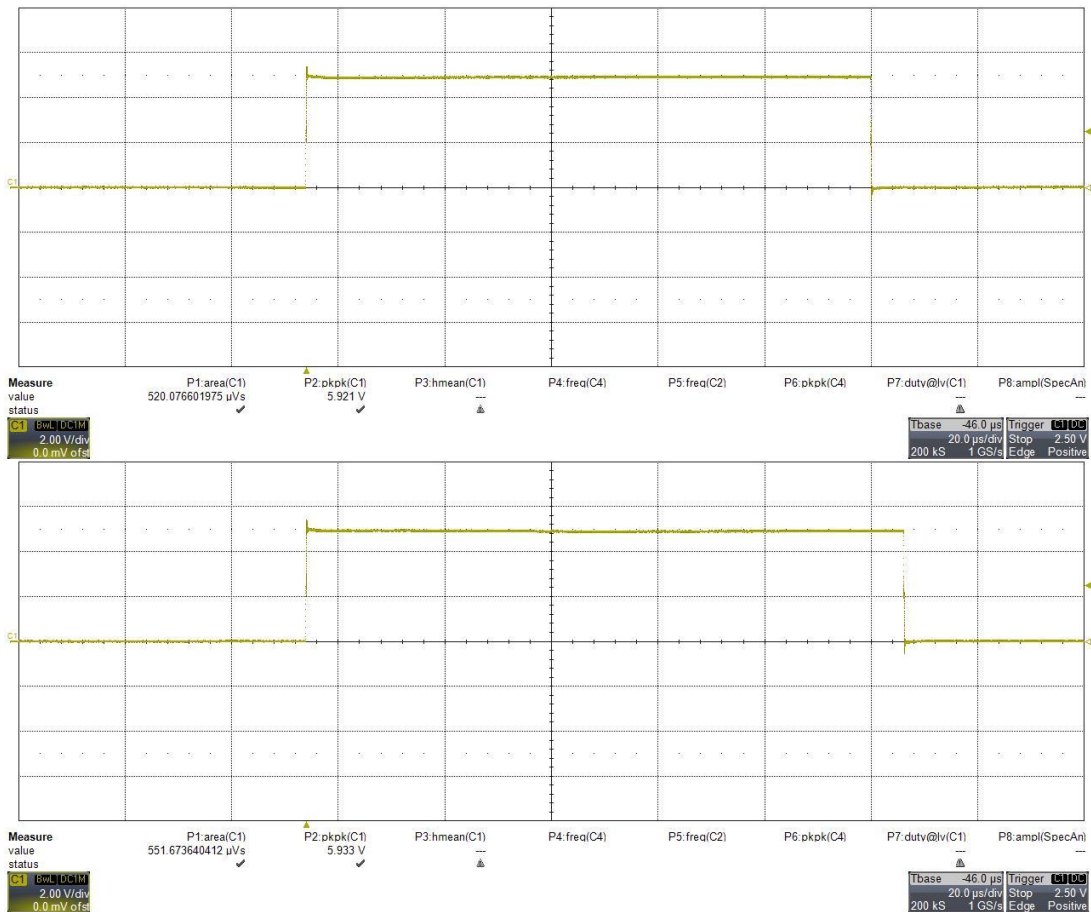


Figura 22 Jitter nel segnale di trasmissione

La causa di tale fenomeno è imputabile all'imprecisione della funzione "delay" del codice caricato su Arduino utilizzata per abilitare e disabilitare la trasmissione degli ultrasuoni. Il problema è stato risolto utilizzando un segnale a modulazione PWM, disponibile sull'Arduino: impostando la frequenza e il duty cycle del segnale di comando, la gestione della trasmissione ultrasonora avviene a livello hardware attraverso un contatore interno, con una precisione maggiore rispetto alla gestione software.

Le successive rilevazioni sono risultate molto più stabili. Pur rimanendo un leggero sfasamento tra il segnale con il provino oscillante e quello senza provino, imputabile alla non contemporaneità delle rilevazioni, la sottrazione tra i due segnali nei due metodi illustrati in precedenza ha generato forme d'onda attendibili e confrontabili:

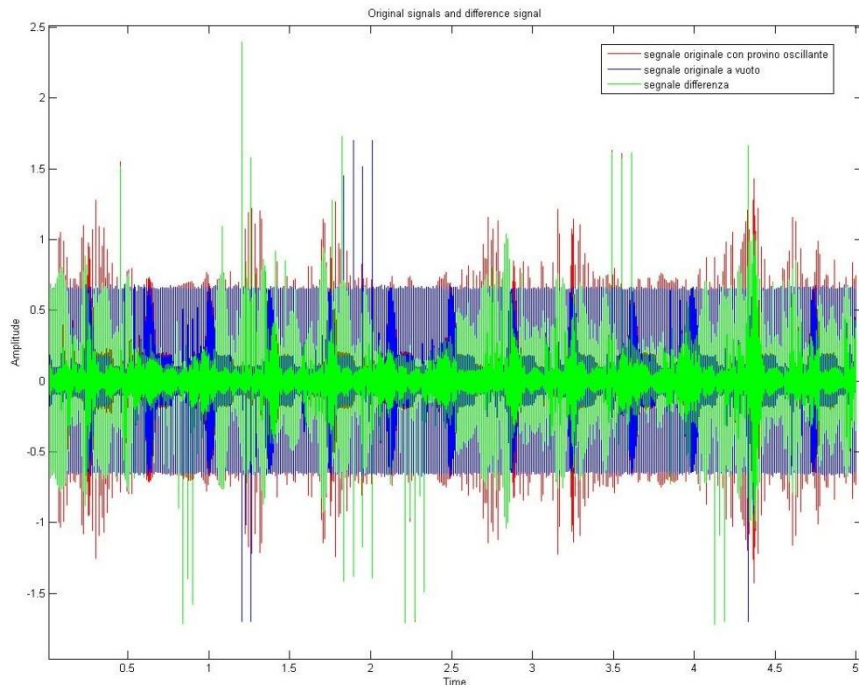


Figura 23 Risultato con differenza tradizionale

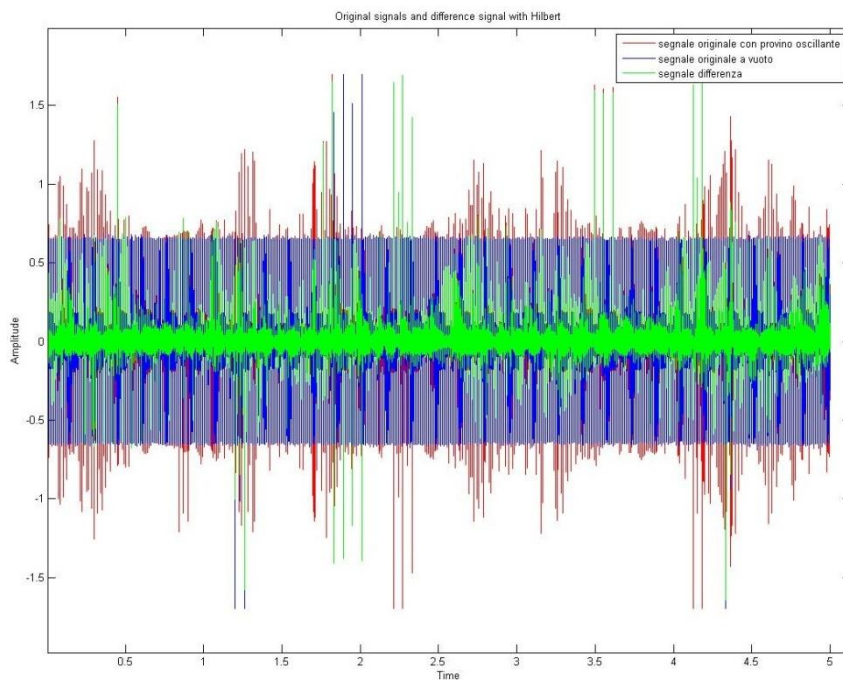
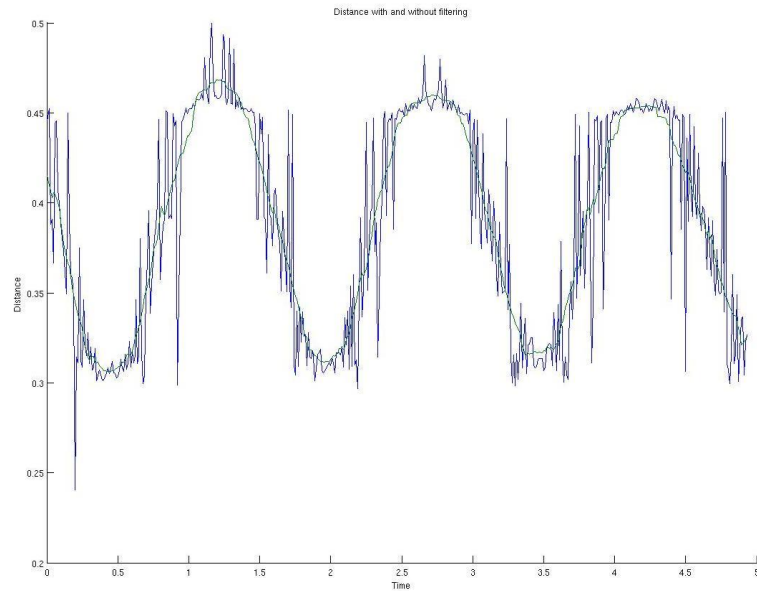


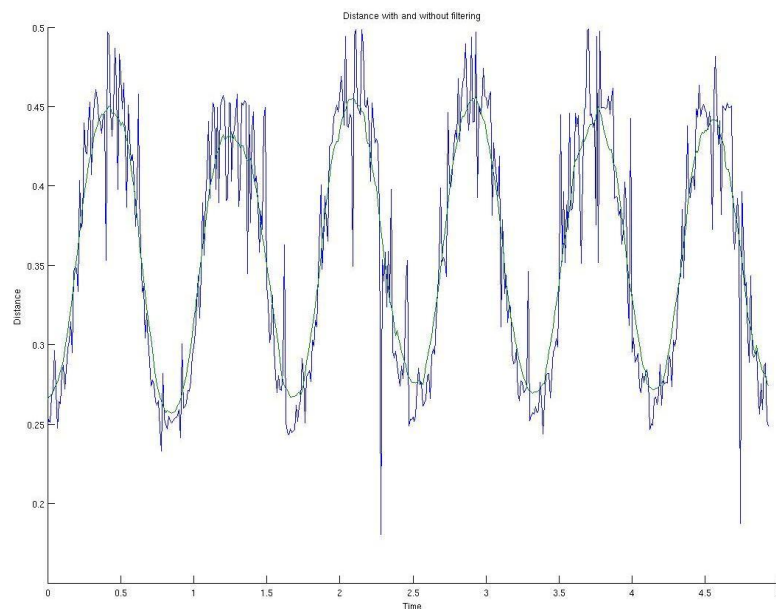
Figura 24 Risultato con differenza tra involuipi

Si nota, innanzitutto, che il segnale senza il provino (blu) è molto più uniforme e stabile rispetto al caso iniziale, mentre quello con il provino (rosso) continua a mostrarne le oscillazioni. Inoltre, la sottrazione origina un segnale già attendibile eseguendola elemento per elemento dei vettori, e risulta ancor più regolare se eseguita tra gli involuipi dei due segnali. Rimangono in essa presenti alcuni disturbi dovuti, oltre al non

perfetto sincronismo dei segnali originali, agli ostacoli a stretta vicinanza con il provino, la cui presenza viene mascherata dalla presenza di quest'ultimo. Proseguendo l'esecuzione del codice Matlab con il segnale differenza tra involucri, si perviene alla stima della posizione del provino in oscillazione naturale e forzata:



*Figura 25 Oscillazione naturale*



*Figura 26 Oscillazione forzata*

Il segnale filtrato (verde) consente di verificare la concordanza tra l'ampiezza stimata e quella effettiva. L'oscillazione di circa 15 cm in quella naturale e l'oscillazione di 20 cm in quella forzata sono compatibili con quelle reali osservate durante le rilevazioni. Contrariamente, risulta scorretta la stima dell'offset (distanza media tra provino e

sensori); entrambe le oscillazioni sono sovrastimate di circa 10 cm. Nell'oscillazione naturale, l'offset misurato tra il sensore e il provino è di 30 cm, mentre in quella forzata è di 24 cm. La causa di questa incongruenza è stata spiegata grazie ad un altro progetto di ricerca sui sensori ad ultrasuoni condotto nel laboratorio integrato di mecatronica. In tale lavoro si è constatato che la dinamica del sistema sensori Tx-Rx è caratterizzata da un tempo di salita di circa 350  $\mu$ s e da uno di discesa compreso tra 500 e 1000  $\mu$ s.

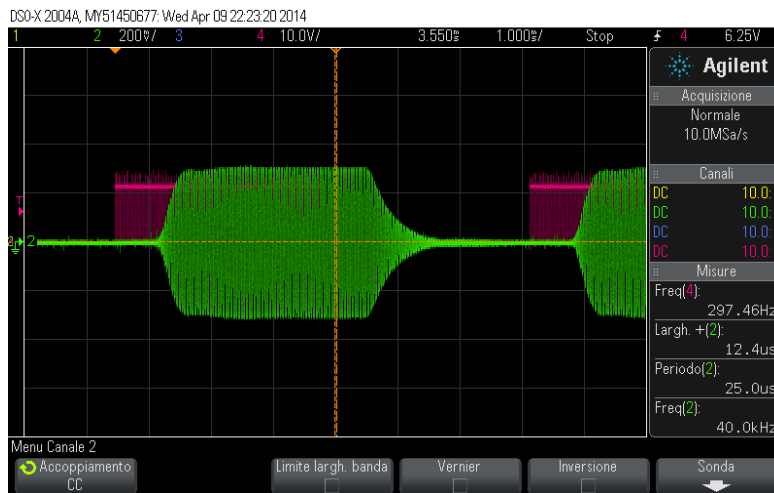
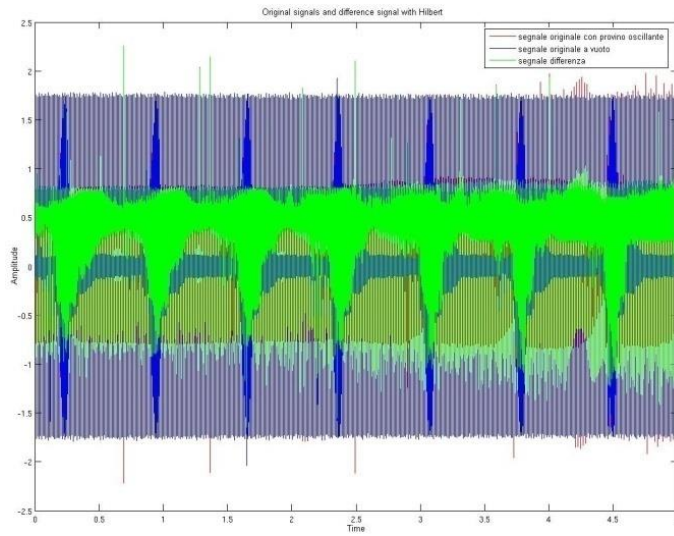


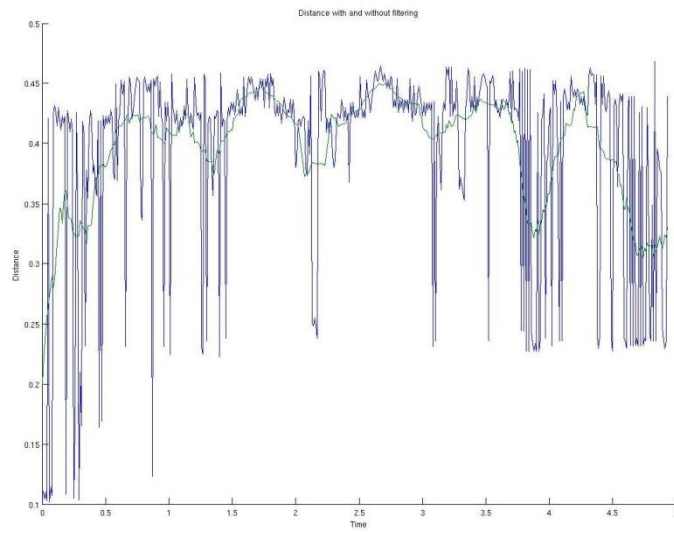
Figura 27 Dinamica del sistema Tx-Rx

Si ritiene, quindi, che l'errore sulla stima dell'offset sia imputabile al tempo necessario al segnale ricevuto di raggiungere il regime, in quanto il codice per la misura della distanza nella ricerca del valore massimo non considera l'inizio effettivo dell'eco ricevuto, bensì un valore del segnale a regime. A prova di ciò, moltiplicando il valore della velocità del suono impostata nel codice Matlab per il tempo di salita del segnale ricevuto, si ricava:  $s = 349 \times 350 \times 10^{-6} = 0,12 \text{ m}$ , ovvero l'errore di offset visualizzato nelle oscillazioni stimate. Si rende, quindi, necessario, nel proseguo di questa sperimentazione, adottare tecniche di calibrazione o ulteriori modifiche al codice che tengano conto di tale non idealità.

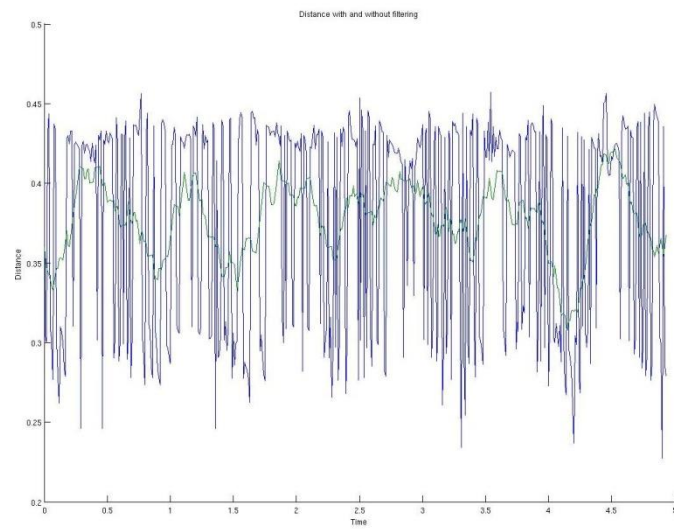
Posizionando i sensori di fronte al crogiolo o inclinati verso di esso, con il provino in moto forzato al suo interno, le considerazioni finora riportate restano valide, e anche i risultati ottenuti rimangono accettabili. Infatti, pur aumentando la presenza di ostacoli, soprattutto quando il sensore è di fronte al crogiolo, dal segnale differenza si ricava una stima del moto del provino compatibile a quello realmente avvenuto:



*Figura 28 Differenza con sensori fronte crogiolo*



*Figura 29 Stima posizione con sensori fronte crogiolo*



*Figura 30 Stima posizione con sensori inclinati su crogiolo*

In questo caso, l'oscillazione risulta meno distinguibile e armonica, ma va considerato che lo spazio dentro il crogiolo è di pochi centimetri e, per sfruttare al meglio lo spazio, l'oggetto nel suo movimento viene a contatto con le pareti del crogiolo. Con i sensori di fronte al crogiolo vi sono ostacoli interposti tra i primi e il provino, per cui ci si aspetta un segnale maggiormente disturbato. In realtà, come si nota, l'entità degli ostacoli (i tubi del circuito di raffreddamento) è meno rilevante della presenza nello sfondo del crogiolo stesso quando i sensori sono posizionati in alto e puntano su di esso.

Le rilevazioni eseguite attraverso l'accelerometro incollato sul provino si prefiggono di ottenere un segnale confrontabile con quello ottenuto dai sensori ad ultrasuoni. La validità delle misure di accelerazione necessita di un'ipotesi fondamentale: nell'oscillazione dell'accelerometro solidale al provino c'è una direzione prevalente, ad esempio x rispetto y, e questa avviene su un piano. Inoltre, non deve esserci rotazione. Se tali ipotesi sono verificate, eseguita la doppia integrazione numerica su entrambe le variabili, è possibile stimare l'andamento della posizione attraverso il modulo applicato alle due direzioni. Purtroppo, già dalle prime rilevazioni, si è notato che, pur essendo l'oscillazione piuttosto marcata, il segnale visualizzato sull'oscilloscopio risulta molto debole, ovvero l'accelerometro risulta poco sensibile alle variazioni di velocità applicabili con il movimento del provino. Infatti, anche selezionando la sensibilità più alta, ovvero  $\pm 1,5g$  (pari a circa  $\pm 14 \text{ m/s}^2$ ), questa risulta insufficiente a rilevare l'accelerazione del provino.

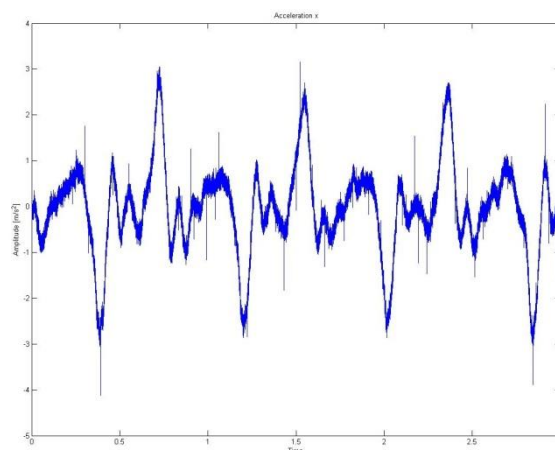


Figura 312 Accelerazione direzione x

In effetti, l'accelerazione applicata al provino è dell'ordine di frazioni di g, per cui il segnale prodotto dal sensore è sempre molto basso e rumoroso (pochi mV). Di conseguenza, l'operazione di doppia integrazione risulta affetta da un grande errore e questo spiega il fatto che il segnale di posizione ottenuto per integrazione corrisponde ad un movimento molto più piccolo di quello reale e, in pratica, non è possibile



confrontarlo con quello ottenuto dal sistema ad ultrasuoni, che invece sembra nettamente più affidabile.

Una verifica potrà essere fatta solo usando un altro accelerometro più sensibile, che attualmente non è disponibile.



## CONCLUSIONI

L'obiettivo principale, ovvero il riconoscimento della posizione del provino metallico eliminando gli effetti degli ostacoli situati nelle vicinanze, è stato raggiunto effettuando prima una misura del segnale riflesso dagli ostacoli in assenza del provino (che costituisce il "riferimento") e successivamente la misura del segnale riflesso in presenza del provino (segnale "utile"). Si determina poi l'involuppo sia del segnale "utile" che di quello di "riferimento" e se ne calcola la differenza. Questa tecnica consente di svincolare il risultato del calcolo dalla fase dei due segnali. Infatti, se si esegue la sottrazione campione per campione, il risultato risente di eventuali variazioni di fase tra il segnale di "riferimento" e quello "utile", che possono risultare temporalmente sfasati a causa delle variazioni di frequenza della sorgente, essendo le rilevazioni eseguite in momenti diversi. Anche il jitter introdotto da Arduino, che talvolta innescava instabilità nell'intera catena di misura, è stato ridotto, e ciò ha consentito di ottenere risultati ancor più apprezzabili. Tali effetti indesiderati venivano provocati da una gestione software dei ritardi che generano l'andamento impulsivo cadenzato del segnale di trasmissione. Pur mantenendo un andamento generalmente rumoroso, la stima della posizione del provino, calcolata a partire dalla sottrazione dei due involuppi, assume un andamento corrispondente a quanto aspettato. Rimane il problema dell'offset spaziale originato dai transitori dei sensori ultrasonici, ma questo può essere agevolmente compensato a livello di codice Matlab, sottraendo al segnale una costante determinata mediante un'accurata calibrazione. Tra gli sviluppi apportabili al sistema, c'è la possibilità di effettuare una media di più rilevazioni a vuoto nelle vicinanze del crogiolo, in modo da migliorare la stima del segnale di "riferimento". Va considerato il fatto che la posizione dei sensori di fronte al crogiolo risulta essere importante, in quanto la presenza di ostacoli, quali le spire per l'induzione e le condotte per il raffreddamento, può nascondere parte del provino metallico. Un upgrade delle schede di trasmissione e ricezione, volto a migliorare la direzionalità del fascio ultrasonico, può incrementare la sensibilità del sistema. Gli ostacoli, infatti, anche se considerevoli, sono fermi e la loro distanza è più grande della lunghezza d'onda, così da consentire ad un'onda sufficientemente collimata di oltrepassarli senza subire le alterazioni. Per tale ragione sarebbe consigliabile sostituire i sensori piezoelettrici con modelli più collimati, oppure progettare il circuito di condizionamento degli stessi in modo da regolare i parametri del sensore in modo da renderli più direzionali. Una possibile ulteriore miglioria è quella di ottimizzare la posizione del trasmettitore e del rilevatore, considerando che, finora, la configurazione rivelatasi più vantaggiosa risulta essere con i sensori sopra il crogiolo inclinati verso di esso. Infine, per la stima della

posizione, quando il crogiolo è in funzione, sarebbe opportuno valutare se e quanto la variazione di velocità del suono dovuta al gradiente di temperatura può avere influenza sulla misura. Com'è noto, con il crogiolo in funzione, la temperatura in sua prossimità subisce una variazione considerevole rispetto al valore ambientale.

Questa ricerca porta a concludere che l'impiego degli ultrasuoni per lo studio della dinamica di un provino metallico entro un crogiolo ad induzione magnetica è una metodologia applicabile con successo, ma che necessita delle naturali evoluzioni che un sistema nei primi stadi di sviluppo richiede.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Alonso M., Finn E.J., 1993, *“Elementi di fisica per l’università, campi e onde”*, Masson.
- [2] Lazzarin R., Strada M., 2007, *“Elementi di acustica tecnica”* Cleup.
- [3] Mazzoldi P., Nigro M., Voci C., 1995, *“Fisica, elettromagnetismo-onde”*, EdiSES.
- [4] Spagnolo R., 2009, *“Manuale di acustica applicata”*, UTET.
- [5] Amaldi U., 1995, *“Fisica per temi”*, Zanichelli.
- [6] Baronio E., 2009/10, *“Esperienze di laboratorio per la calibrazione di un rilevatore di difetti digitale ultrasonico”*, Università degli studi di Parma.
- [7] De Leo C., Ferrero P., 2003/04, *“Sviluppo realizzazione e collaudo di un sistema ad ultrasuoni per controlli non distruttivi in immersione, capitolo 3: Teoria degli ultrasuoni”*, Politecnico di Milano.
- [8] [http://conrad.ru/doci/Ultrazvukovoy\\_priemnik\\_Murata\\_40\\_kGts\\_506193\\_en.pdf](http://conrad.ru/doci/Ultrazvukovoy_priemnik_Murata_40_kGts_506193_en.pdf)
- [9] <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
- [10] [http://www.microbot.it/documents/mr003-002\\_datasheet\\_it.pdf](http://www.microbot.it/documents/mr003-002_datasheet_it.pdf)
- [11] Mazzoldi P., Nigro M., Voci C., 2005, *“Elementi di Fisica, elettromagnetismo”*, EdiSES.
- [12] Ricci E., 2011, *“Atlante di Fisica”*, Giunti.
- [13] Chitarin G., Timelli G., Losco R., Bonollo F., *“Development and operational experience on Cold Crucible Levitation Melting apparatus for light metal casting”* University of Padova, Dept. of Management and Engineering (DTG).
- [14] Timelli G., Chitarin G., Tiziani A., Bonollo F., 2012, *“Design and realization of an experimental cold crucible levitation melting system for light alloys”*
- [15] Carlassara D., 2010/11, *“Sistemi in vuoto o in atmosfera controllata per la fusione di metalli leggeri”*, Università degli studi di Padova.
- [16] Roana A., 2010/11, *“Fusione ad induzione e levitazione magnetica in crogiolo freddo”*, Università degli studi di Padova.
- [17] Toniolo A., 2010/11, *“Esperimenti di fusione e solidificazione in crogiolo a levitazione magnetica”*, Università degli studi di Padova.
- [18] Definizioni di carattere generale tratte da <http://www.treccani.it/> e [https://it.wikipedia.org/wiki/Pagina\\_principale](https://it.wikipedia.org/wiki/Pagina_principale)