

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Biomedica

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Progettazione di un sistema di stimolo dell'apparato nervoso per pazienti con malattie degenerative**



### **Relatori**

Prof. Umberto Lucia

Sig. Maurizio Bressan

### **Candidato**

Gabriele Bardi

253203

**27 MARZO 2020**





# INDICE

<b>1. SISTEMA NERVOSO</b> .....	1
1.1 IL SISTEMA NERVOSO CENTRALE.....	1
1.2 IL SISTEMA NERVOSO PERIFERICO.....	1
1.2.1 I nervi .....	2
1.3 NEURONI.....	3
1.4 DISFUNZIONI DEL SISTEMA NERVOSO.....	4
1.4.1 Intorpidimento .....	4
1.4.2 Atassia sensitiva.....	5
<b>2. VIBRAZIONI MECCANICHE</b> .....	8
<b>3. BENEFICI DELLE VIBRAZIONI MECCANICHE APPLICATE AL CORPO UMANO</b> .....	12
3.1 FOCAL VIBRATION.....	13
3.2 MULTI FOCAL VIBRATION .....	13
3.3 RIPETITIVE MUSCLE VIBRATION .....	14
3.4 VIBRAZIONI SUL SISTEMA ORMONALE.....	15
3.5 NERVE GROWTH FACTOR .....	15
3.6 VIBRAZIONE SUL SISTEMA MUSCOLO SCHELETRICO .....	16
3.7 VIBRAZIONE SUL TESSUTO OSSEO.....	16
3.8 VIBRAZIONE SULL'OBESITA' E OSTEOPOROSI.....	17
3.9 VIBRAZIONE SULLA TERAPIA DEL DOLORE .....	17
3.10 VIBRAZIONE SULLA CIRCOLAZIONE SANGUIGNA .....	17
<b>4. SOLETTA VIBRANTE</b> .....	19
4.1 COME GENERARE VIBRAZIONI MECCANICHE.....	20
4.1.1 Motorino a massa eccentrica rotante (erm) .....	20
4.1.2 Attuatore lineare risonante (LRA) .....	24
4.1.3 Attuatori piezoelettrici .....	24
4.2. CONCEPT.....	25
4.3. SCHEMA A BLOCCHI DELLA SOLETTA VIBRANTE .....	31
4.3.1. Principi di funzionamento estensimetro e ponte di Wheatstone.....	32
4.3.2. Circuito di amplificazione .....	38
4.3.3. Blocco del trigger di Schmitt .....	40
4.3.4. Blocco relativo al NE555 e controllo PWM .....	45
4.3.5. Blocco motorino .....	54
4.4. ALIMENTAZIONE .....	58

4.5.	CARICA BATTERIE.....	59
4.6.	STRESS ANALYSIS.....	64
	<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....</b>	<b>76</b>

# 1. SISTEMA NERVOSO

Il sistema nervoso permette al nostro corpo di mettersi in relazione con l'ambiente esterno tramite impulsi nervosi, si divide in sistema nervoso centrale (SNC) e sistema nervoso periferico (SNP).<sup>1-2</sup>

## 1.1 IL SISTEMA NERVOSO CENTRALE

Il SNC ha il compito di ricevere le informazioni ricevute dal SNP, di elaborarle e di trasmettere una risposta al resto del corpo. In particolare, il segnale proveniente dal SNP passa attraverso il midollo spinale e raggiunge l'encefalo dove viene rielaborato e viene generata una risposta adeguata all'eccitazione.<sup>3-5</sup>

Il SNC ha quindi due parti fondamentali:

- L'encefalo, protetto dalle meningi è inserito all'interno della scatola cranica, è formato da neuroni e fibre nervose le quali lo collegano al midollo spinale e che consentono quindi il collegamento con il resto del corpo. Il suo compito fondamentale è quello di elaborare l'informazione ricevuta e di generare una risposta adeguata.<sup>6</sup>
- Il midollo spinale, anch'esso protetto da meningi è situato all'interno della colonna vertebrale, svolge la funzione di collegamento dell'encefalo con il resto dell'organismo mediante fibre nervose.<sup>7-8</sup>

## 1.2 IL SISTEMA NERVOSO PERIFERICO

Il SNP è costituito da fibre nervose e da gangli, a sua volta può essere suddiviso in due parti, sistema nervoso somatico e sistema nervoso autonomo.<sup>9-11</sup>

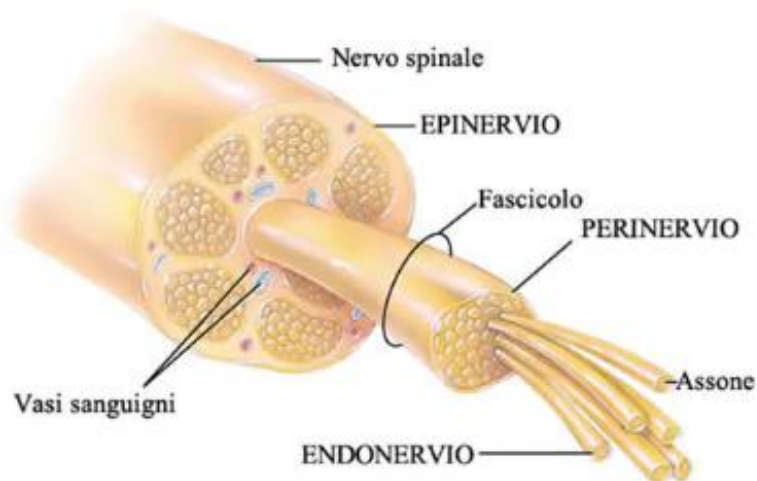
- Il sistema nervoso somatico si occupa di trasportare informazioni riguardanti i sensi e i movimenti al SNC, trasporto che avviene attraverso fibre nervose, sono presenti prevalentemente due tipologie di neuroni, i motoneuroni che portano informazioni dal cervello alle fibre muscolari e che quindi permettono di controllare i muscoli e da neuroni sensitivi che portano informazioni riguardanti i sensi provenienti dai nervi.

Questo sistema ci permette quindi di compiere movimenti involontari come quello di muovere la gamba quando si sollecita il ginocchio, ciò avviene quando i nervi si connettono

direttamente con il midollo spinale permettendo quindi un movimento che non è comandato dal cervello.<sup>12</sup>

- Il sistema nervoso autonomo regola e comanda funzioni spontanee e riflesse del nostro organismo agendo sulla muscolatura, funzioni fondamentali come ad esempio il battito cardiaco.<sup>13</sup>

### 1.2.1 I nervi

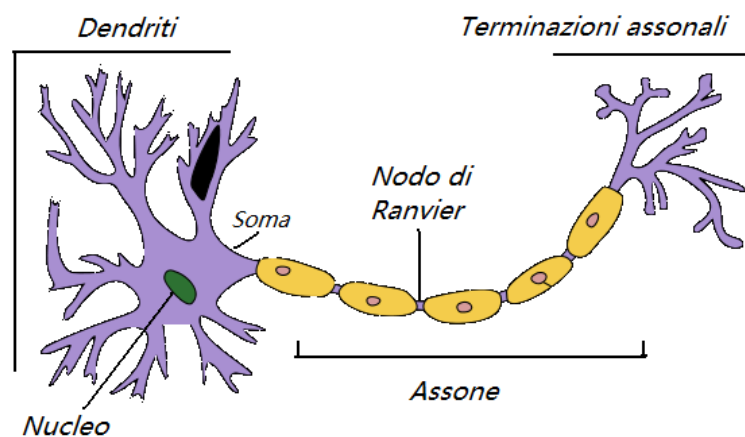


I nervi sono strutture fondamentali del SNP, sono formati da fasci organizzati di assoni e consentono quindi la trasmissione dell'impulso nervoso tra SNC e periferia in entrambi i sensi. Dal punto di vista anatomico i fasci di assoni prendono il nome di funicoli, sono rivestiti da un tessuto ricco di fibre di collagene chiamato endonervio che ha la funzione di protezione e di rigenerazione delle parti danneggiate. A loro volta i complessi di funicoli prendono il nome di fascicoli anch'essi rivestiti da un tessuto connettivo chiamato perinervio, costituito da più strati di collagene, che ha la funzione di garantire maggiore robustezza e resistenza, infine è presente un ultimo rivestimento di tessuto connettivo chiamato epinervio che serve per salvaguardare l'interno da sollecitazioni esterne, ha quindi una funzione protettiva.<sup>14</sup>

All'interno del nervo sono anche presenti vasi sanguigni sia arteriosi che venosi con lo scopo di portare tutte le sostanze necessarie alla sopravvivenza del nervo stesso come ossigeno e sostanze nutrienti.

Nel nostro corpo sono presenti due tipologie di nervi: cranici e spinali. I primi hanno origine direttamente nel cervello e lo collegano a diverse regioni della testa e del collo, i nervi spinali invece partono dal midollo spinale e innervano sostanzialmente tutto quello che non viene innervato dai nervi cranici. Un'ulteriore distinzione viene fatta sulla base del tipo di assone che compone il nervo e di conseguenza sulla tipologia di neurone, otteniamo così nervi sensitivi o afferenti, motori o efferenti e nervi misti.<sup>15</sup>

### 1.3 NEURONI



Il tessuto nervoso è formato da cellule fondamentali chiamate neuroni, essi hanno il compito di ricevere, elaborare e trasmettere informazioni ad altre cellule attraverso un impulso elettrico con lo scopo di far funzionare correttamente il nostro organismo e di permettere di relazionarci con l'ambiente esterno.

Il neurone presenta un corpo cellulare chiamato soma all'interno del quale è presente il nucleo, dal corpo cellulare si diramano diverse fibre, le più corte prendono il nome di dendriti e sono presenti in quantità molto elevate, hanno il compito di trasportare l'informazione dall'esterno della cellula all'interno infatti presentano dei siti post-sinaptici che consentono all'impulso nervoso di raggiungere il nucleo.

Ogni neurone è dotato anche di un assone, struttura a tronco di cono su cui scorre l'informazione proveniente dal nucleo, mentre la sua larghezza è piuttosto ridotta (intorno al micrometro) la sua lunghezza può essere anche superiore al metro. L'assone ha quindi il fondamentale compito di trasportare l'informazione in uscita del neurone ad altre cellule, infatti nella sua parte terminale, che



tipicamente è ramificata sono presenti dei siti postsinaptici che consentono il passaggio di informazioni ai dendriti di altri neuroni o direttamente ad altre cellule come quelle muscolari. L'assone deve consentire una rapida trasmissione del segnale e proprio per questo motivo è rivestito da una guaina isolante (guaina mielinica), tale guaina per ottimizzare la velocità di trasmissione presenta delle interruzioni chiamate Nodi di Ravier, nodi in cui avviene il vero e proprio scambio ionico.<sup>16-17</sup>

I neuroni si possono dividere in tre categorie in base alla loro funzione:

- Neuroni sensitivi o afferenti, sono neuroni che trasportano le informazioni ricevute dai recettori sensoriali direttamente al SNC.
- Interneuroni o neuroni intercalari, consentono di far comunicare i neuroni sensitivi con quelli motori.
- Neuroni motori o efferenti, chiamati anche motoneuroni trasmettono impulsi motori agli organi.

## **1.4 DISFUNZIONI DEL SISTEMA NERVOSO**

### **1.4.1 Intorpidimento**

Una disfunzione del sistema nervoso e quindi un danneggiamento dei nervi può provocare intorpidimento ovvero la perdita parziale o totale della sensibilità, sensibilità che può essere al tatto, dolorifica e termica o vibratoria e di posizione.<sup>18</sup>

Il danneggiamento dei nervi può essere provocato da diverse patologie come:<sup>19</sup>

- Ischemia, cioè la riduzione o assenza di flusso sanguigno causata ad esempio da ictus ischemico, vasculite o infarto midollare.
- Malattie demielinizzanti ovvero la perdita dello strato più esterno dei nervi a causa della sclerosi multipla o della sindrome di Guillain-Barrè.
- Compressione del nervo causata da ernia al disco, tumori o sindrome del tunnel carpale.
- Infezioni a causa di patologie come HIV e lebbra.
- Tossine e farmaci a causa di un avvelenamento da metalli pesanti (piombo) o attraverso l'assunzione di farmaci con effetti collaterali che gravano sul SNP come quelli utilizzati nella cura di determinati tumori.

- Disturbi del metabolismo causati da diabete o da malattie renali croniche.
- Disturbi immuno-mediati.
- Disturbi degenerativi dovuti a neuropatie ereditarie.

Il nostro corpo si relaziona con l'ambiente esterno mediante organuli microscopici chiamati recettori sensoriali che sono in grado di generare un impulso nervoso che si propaga nel corpo fino al SNC in funzione di una variazione energetica dell'ambiente esterno, come a esempio una variazione di pressione, di temperatura, di dolore o meccanica.

I recettori sensibili a variazioni meccaniche prendono il nome di Meccanorecettori, si possono suddividere sulla base dell'adattamento e delle dimensioni dell'area di percezione ma tuttavia non tutti risultano sensibili alle vibrazioni, in particolare quelli che riescono a percepire lo stimolo vibratorio si dividono in tre classi:

- Meccanorecettori a adattamento rapido, sono superficiali e si trovano al livello del derma, sono sensibili al movimento e prendono il nome di corpuscoli di Meissner.
- Meccanorecettori a adattamento lento chiamati dischi di Merkel sensibili sia all'intensità dello stimolo che al movimento, sono anch'essi a livello del derma.
- I corpuscoli del Pacini presenti nel tessuto sottocutaneo.

A seguito di numerosi studi si è dimostrato che i corpuscoli del Pacini sono i meccanorecettori maggiormente coinvolti nella stimolazione vibratoria, infatti essi sono sensibili a frequenze intorno a 100Hz, per quanto riguarda i recettori superficiali, i corpuscoli di Meissner si attivano per stimoli fino ai 40Hz, a queste frequenze però il nostro corpo non percepisce tanto una vibrazione ma più una sensazione di tremore.<sup>20</sup>

Un danneggiamento dei recettori sensoriali implica quindi una perdita di sensibilità parziale o totale che ha diversi effetti dannosi sul nostro organismo e sul nostro modo di vivere, in particolare colpisce il soggetto con disturbi motori come l'atassia sensitiva o a patologie come il piede diabetico.

#### **1.4.2 Atassia sensitiva**

L'atassia sensitiva è causata da un danneggiamento delle vie propriocettive, ovvero, quelle vie che tramite impulsi nervosi trasportano le informazioni sensitive ricevute dai recettori fino al SNC.

Questa patologia porta a un disturbo nel controllo motorio del corpo, in cui gioca un ruolo fondamentale anche il tono muscolare che perciò va considerato. In particolare, il tono muscolare

secondo la definizione di Charles Foix è la “tensione attiva dei muscoli, permanente e involontaria, variabile per intensità a seconda delle differenti azioni, riflesse o sincinetiche, che la rinforzano o l'inibiscono”. La contrazione tonica è quindi dipendente da stimoli nervosi provenienti dai recettori che qualora fossero danneggiati la inibiscono, ne consegue che un paziente affetto da atassia è anche soggetto a ipotonia ovvero a una riduzione del tono muscolare; determinate patologie come la sclerosi multipla portano invece ad avere una condizione di spasticità e quindi a un aumento anomalo del tono muscolare causando sindromi atasso-spastiche. <sup>21</sup>

I principali disturbi motori causati dall' atassia sensitiva si possono sostanzialmente dividere in due tipologie: disturbi della marcia e disturbi nel mantenimento della postura eretta.

Nel mantenimento della postura eretta ovvero una posizione in cui il corpo è soggetto solamente alla forza di gravità, fermo e in piedi, un paziente affetto da atassia sensoriale presenta un allargamento della base d'appoggio, in condizioni non patologiche i piedi dovrebbero mantenere una posizione trocanterica ovvero disposti al di sotto dell'articolazione dell'anca. Inoltre, il paziente è in grado di mantenere la posizione eretta quando ha gli occhi aperti, ma chiudendoli inizia ad avere molte oscillazioni che lo possono portare anche alla caduta, poiché la vista non è compromessa e compensa il danneggiamento periferico dei recettori sensoriali.

Il soggetto atassico presenta un segno di Romberg positivo, in alcuni casi ancora più gravi il soggetto non è in grado di mantenere la posizione eretta neanche con gli occhi aperti.

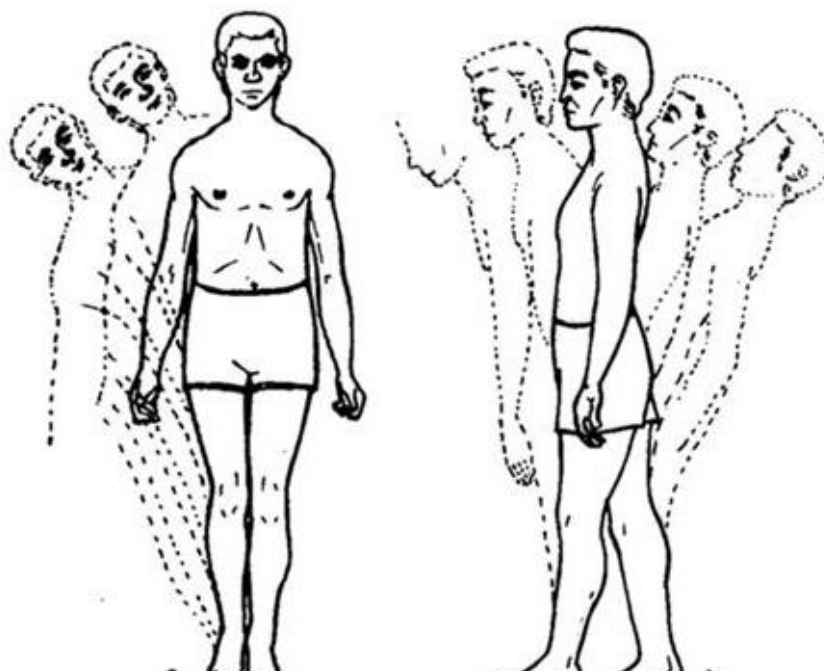


Figura 1. Oscillazioni posturali del paziente nel Test di Romberg **b**

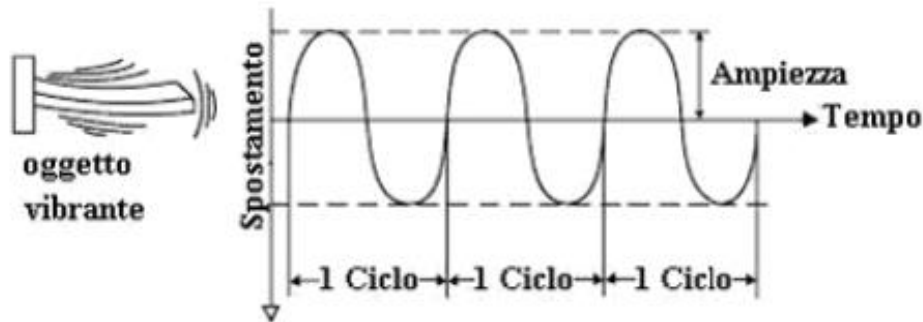
Nella fase di movimento invece la marcia è tipicamente possibile a occhi aperti ma con un andamento non fisiologico, infatti presenta un'andatura talloneggiante, ovvero, una marcia in cui il ginocchio viene sollevato più in alto della condizione fisiologica e il tallone viene sbattuto con forza per terra a differenza dell'andatura fisiologica in cui è la punta del piede a toccare terra. Anche in questa fase dinamica ovviamente abbiamo un peggioramento della camminata qualora il paziente chiuda gli occhi.<sup>22</sup>

Ulteriori disturbi sono a discapito dei movimenti articolari volontari come la prova naso-indice o calcagno-ginocchio e l'impossibilità di mantenere una postura con gli occhi chiusi.

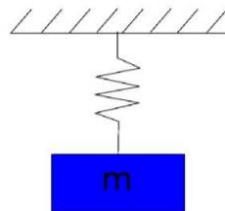
Diversi studi, che vedremo in seguito evidenziano come pazienti affetti da patologie come l'ataxia periferica o intorpidimento degli arti e quindi patologie legate a un danneggiamento del sistema nervoso, ottengano numerosi benefici qualora gli venissero somministrate delle terapie a base di vibrazioni meccaniche.

## 2. VIBRAZIONI MECCANICHE

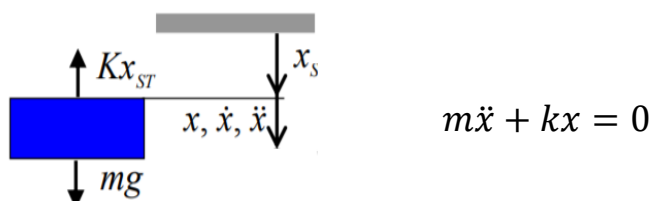
La vibrazione è un'oscillazione meccanica intorno a un punto di equilibrio e può essere periodica o casuale, i parametri da analizzare sono il periodo in secondi (s) da cui si riesce ad ottenere la frequenza dell'onda in Hertz (Hz) che quindi fornisce il numero di oscillazioni nell'unità di tempo e l'ampiezza.



In base al valore di frequenza le vibrazioni si possono dividere in bassa (0.1-2 Hz), media (2-20Hz) e alta frequenza (>20Hz) tali oscillazioni sul corpo umano possono portare sia a effetti benefici sia a effetti negativi, a seconda di diversi fattori come il valore d'ampiezza della superficie di contatto con l'oggetto vibrante, l'intensità della vibrazione, il tempo di applicazione e la direzione di propagazione dell'onda.<sup>23</sup>



Una condizione necessaria per un corpo di oscillare è che sia dotato di una certa massa ed elasticità, ipotizzando di considerare un sistema massa/molla a 1 grado di libertà libero (gdl) e non smorzato come in figura e osservando il diagramma di corpo libero in condizioni dinamiche si ottiene un'equazione dell'equilibrio dinamico, tale equazione è un'equazione differenziale del secondo ordine e omogenea



La soluzione sarà del tipo:

$$x = A\cos(\lambda t) + B\sin(\lambda t)$$

$$\dot{x} = -\lambda A\sin(\lambda t) + \lambda B\cos(\lambda t)$$

$$\ddot{x} = -\lambda^2[A\cos(\lambda t) + B\sin(\lambda t)] = -\lambda^2 x(t)$$

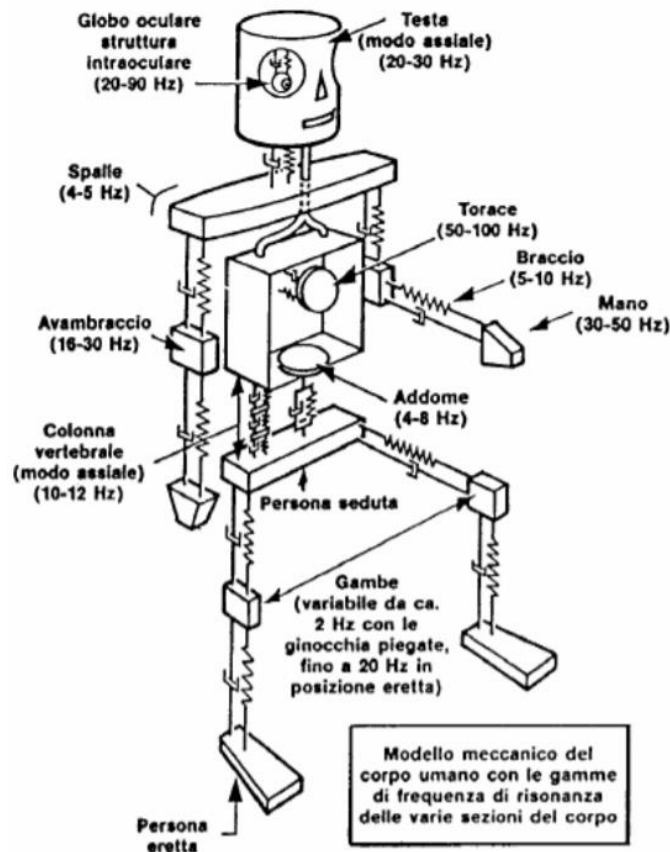
Sostituendo si ottiene che

$$-\lambda^2 m x + k x = 0$$

$$-\lambda^2 m + k = 0$$

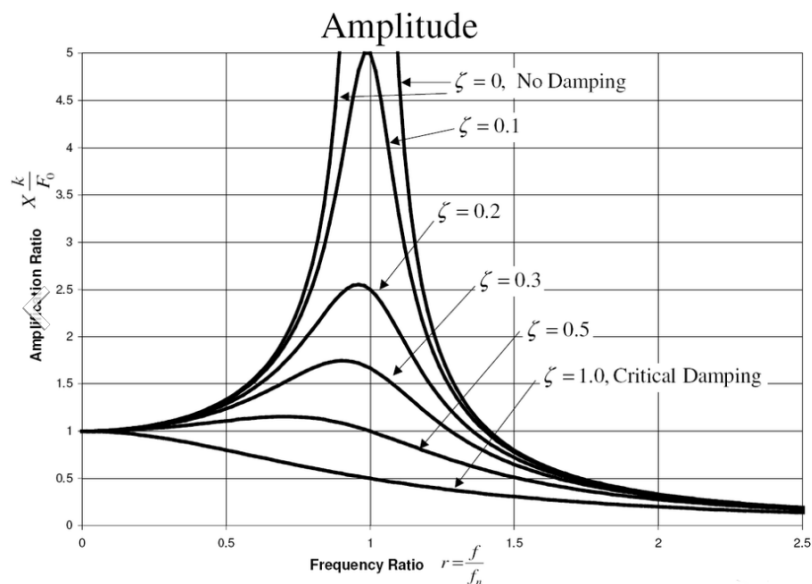
$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{m}} = \lambda_n$$

Dove  $\lambda_n$  è la pulsazione propria con unità di misura di rad/sec e rappresenta la pulsazione alla quale il sistema a 1gdl massa/molla oscilla rispetto al suo punto di equilibrio qualora venisse perturbato; dividendo la pulsazione propria per  $2\pi$  otteniamo la frequenza propria in Hz, un parametro molto importante nell'analisi delle vibrazioni.<sup>24</sup>



In realtà il modello appena descritto è semplificato rispetto alla realtà, il corpo umano è molto più complesso di un sistema massa/molla e tipicamente nello studio delle vibrazioni può essere schematizzato come nella figura precedente, si può notare come non sarà più un sistema a 1gdl ma avrà più gradi di libertà e inoltre avremo un sistema massa/molla/smorzatore. Fondamentale è osservare come non ci sarà più un'unica frequenza propria per tutto il corpo ma organi e segmenti avranno frequenze differenti.<sup>25</sup>

Per studiare la vibrazione applicata sul corpo umano utilizzeremo un sistema massa/molla/smorzatore che però sarà soggetto a una forza sinusoidale, di fondamentale importanza diventa la frequenza dell'eccitazione rispetto alla frequenza propria del sistema che stiamo studiando, poiché, in base a ciò avremo amplificazioni o attenuazioni del moto rispetto alla vibrazione eccitante.



Questo grafico rappresenta i fattori di amplificazione e di attenuazione subiti dalla vibrazione, a seconda della frequenza a cui si stimola e in funzione dello smorzamento del sistema ( $\zeta$ ), si possono osservare tre casi:

- Frequenza ( $f$ ) della forza maggiore della frequenza propria del sistema ottenendo un rapporto  $\frac{f}{f_n} > 1$  siamo nell'area del grafico dominata dalla massa, zona in cui avremo un'attenuazione
- $\frac{f}{f_n} = 1$  con un rapporto vicino a 1 siamo in una condizione pericolosa poiché avremo un'amplificazione estremamente alta, questo fenomeno prende il nome di risonanza.

- $\frac{f}{f_n} < 1$  siamo nella zona dominata dalla rigidità, dove si ottiene un'amplificazione tenue del segnale in input.

Si osserva quindi che forzanti a determinate frequenze possono essere dannose per il nostro organismo a causa di un'amplificazione elevata del segnale di input, d'altra parte sono stati osservati numerosi benefici, bisogna però per massimizzare tale effetto considerare anche ulteriori parametri come la durata dell'esposizione, l'area sui cui agisce la vibrazione, la posizione posturale del soggetto e anche fattori non prettamente tecnici come la condizione psicologica e ambientale.

Come già scritto in precedenza le vibrazioni meccaniche erogate sul corpo umano sono in grado di portare numerosi benefici sia a persone sane, sia a persone affette da patologie degenerative come il diabete.

Nel successivo capitolo verranno esposti e descritti i principali effetti benefici portati dalle vibrazioni meccaniche sul nostro corpo.



### **3. BENEFICI DELLE VIBRAZIONI MECCANICHE APPLICATE AL CORPO UMANO**

Prima di tutto è importante capire perché per il ripristino della corretta biomeccanica umana si utilizzano vibrazioni meccaniche e non elettriche, le prime interagiscono stimolando direttamente i meccanorecettori e quindi attivano l'apparato muscolare mediante il sistema propriocettivo, invece un'elettrostimolazione non interagisce con i meccanorecettori e quindi non attiva il sistema propriocettivo, ma mantiene una stimolazione più circoscritta portando alla contrazione solamente i muscoli agonisti.<sup>26</sup>

Gli studi di Pavlov eseguiti nel 1927 riguardanti la modifica di determinate caratteristiche motorie di un gatto sollecitato da una successione di impulsi, hanno portato gli studiosi a definire un fenomeno a livello cellulare chiamato Long Term Potentiation (LTP) ovvero potenziamento a lungo termine, poiché gli effetti associativi sul paziente persistono per settimane o mesi a fronte di pochi minuti/ore di stimolazione. Tale potenziamento, deriva dalla capacità di plasticità del nostro sistema nervoso, ovvero l'abilità del cervello di riorganizzare e modificare l'intensità dei collegamenti sinaptici (non solamente a causa di un danno al SNC ma anche per fenomeni di memoria e apprendimento) a fronte di determinate stimolazioni, in particolare LTP è un processo che viene indotto da una stimolazione tetanica delle sinapsi.<sup>27</sup>

Attraverso la stimolazione meccanica ad alta frequenza, percepita come vibrazione dal paziente, si è quindi riuscito a indurre sul sistema propriocettivo un potenziamento a lungo termine, portando un rapido e persistente miglioramento alla performance muscolare, miglioramento che non dipende solamente dalla vibrazione meccanica ma anche dal tipo di muscolo stimolato, in particolare per indurre un potenziamento sui muscoli gravitari la vibrazione viene erogata a muscolo rilassato mentre per muscoli scheletrici si osserva un aumento dell'efficacia quando la vibrazione è erogata in concomitanza di una contrazione volontaria del paziente.

Questi effetti sul sistema muscolo-scheletrico sono molto importanti sia in ambito sportivo, che in ambito riabilitativo, poiché la capacità muscolare di un atleta non dipende dalla dimensione e quindi dalla massa del muscolo ma da come viene gestita, controllo che appunto viene migliorato tramite LTP del sistema propriocettivo portando sostanziali benefici al gesto sportivo, come ad esempio rendere il paziente più veloce o più potente.

Questi effetti vengono dimostrati dagli studi del Professore Carmelo Bosco che elaborò un protocollo di allenamento con vibrazioni meccaniche che fu in grado di portare incrementi alla resistenza,

velocità e potenza del soggetto, protocollo applicabile non solamente a sportivi ma anche ad anziani e a pazienti sottoposti a recupero post traumatico. <sup>28</sup>

E' importante dividere le vibrazioni in base al punto di erogazione, infatti si può avere una stimolazione focale (focal vibration, FV) che permette di erogare la vibrazione in maniera più mirata coinvolgendo solamente alcuni tipi di recettori ma con potenze più elevate oppure si può erogare una vibrazione che coinvolga l'intero corpo in completo scarico funzionale (Multi Focal Vibration, MFV), il corpo viene quindi stimolato su più punti ma con frequenze precise in maniera tale da coinvolgere solamente i meccanorecettori cutanei come i Pacini e i Meisner, queste tipologie di eccitazione a differenza di una stimolazione whole body mediante pedane vibranti permettono di evitare la propagazione del segnale meccanico attraverso i tessuti che causerebbero una distorsione del segnale, invece con FV e MFV siamo in grado di stimolare con precisione determinati recettori e sapere con certezza, senza la presenza di rumore, il codice del segnale applicato.

### **3.1 FOCAL VIBRATION**

La caratteristica fondamentale della vibrazione focale è il fenomeno del “diving”, cioè i recettori generano impulsi nervosi alla stessa frequenza ai quali vengono stimolati, permettendo così di selezionare quali afferenze attivare e con quali frequenze raggiungere il SNC, ciò permette di stimolare direttamente il SNC con dei parametri scelti a priori solamente modificando le caratteristiche della vibrazione in input. <sup>29</sup>

Per ottenere dei risultati con una vibrazione mirata bisogna rispettare alcune regole:

- Per ottenere il fenomeno del diving bisogna utilizzare un segnale “puro”, cioè costituito da un'unica armonica ovvero da un'unica frequenza, tale frequenza deve essere compresa tra i 90 e 120Hz se stiamo stimolando un muscolo.
- Per indurre LTP la stimolazione deve durare un tempo sufficiente a indurre plasticità, una decina di minuti circa.

### **3.2 MULTI FOCAL VIBRATION**

La vibrazione multifocale può essere vista come la vibrazione focale ma su più punti, riuscendo così a stimolare diverse zone con frequenze differenti, eccitare a diverse frequenze è utile poiché come già visto il corpo umano non oscilla come un'unica massa e quindi presenta frequenze proprie

differenti a seconda del segmento che stiamo considerando, si riesce così a ottimizzare l'effetto della vibrazione.<sup>30</sup>

Il limite di questa tecnica è che deve essere eseguita in completo scarico funzionale e con le articolazioni in decoaptazione, ciò è reso possibile da strutture ergonomiche come la Keope.

### **3.3 RIPETITIVE MUSCLE VIBRATION**

A seguito di alcuni protocolli terapeutici che utilizzavano le vibrazioni meccaniche si è introdotto il concetto di vibrazione ripetuta sui muscoli (rMV), vibrazione ripetuta poiché si è visto che una vibrazione continuativa per 10 minuti per 3 volte al giorno per 3 giorni consecutivi porta a ottenere una LTP nel minor tempo possibile, inducendo quindi un miglioramento nel controllo motorio dell'articolazione, bisogna prestare particolare attenzione al tempo di applicazione, poiché è stato dimostrato che è sconveniente stimolare per più di 10 minuti poiché l'organismo si abitua e si perde quindi efficienza.<sup>31</sup>

Alcuni studi hanno riportato come la vibrazione sia in grado di indurre un miglioramento nel controllo motorio dell'articolazione, portando ad un aumento fino al 40% della resistenza a fatica dell'esercizio. La causa di tali benefici è legata a un controllo della rigidità articolare più efficace, dovuto ad una coattivazione dei muscoli che viene comandata direttamente dal SNC, tale parametro risulta quindi di fondamentale importanza nel campo della riabilitazione.<sup>32</sup>

Ulteriori studi sono stati effettuati per cercare di capire come rMV fosse in grado di generare modifiche plastiche direttamente nella zona di controllo del muscolo stimolato, in particolare si è andati a studiare la corteccia motrice primaria (M1), ovvero l'area della corteccia motoria che controlla direttamente l'esecuzione dei movimenti. Barbara Marconi e i suoi collaboratori per fare luce su questo fenomeno hanno utilizzato una stimolazione magnetica transcranica, che permette di stimolare delle porzioni molto piccole della regione M1, potenziale che viene registrato mediante EMG consentendo così di analizzare il meccanismo di plasticità. I risultati di questo test hanno evidenziato come le aree relative al muscolo trattato subiscano meccanismi inibitori, mentre le aree del muscolo antagonista vengano favorite, questo potenziamento è in grado di durare per 15 giorni e valgono solamente se oltre alla vibrazione è associata anche una contrazione volontaria, infatti la plasticità è causata da un meccanismo in cui partecipino diverse cellule contemporaneamente, è quindi un fenomeno di tipo associativo.<sup>33</sup>

L'aumento della resistenza a fatica di cui abbiamo parlato prima è quindi causato da una riduzione delle coattivazioni e da un più efficace rapporto agonista/antagonista, che porta inoltre a una diminuzione del tempo per raggiungere la forza massima del muscolo.

La tecnica del rMV è molto utile anche applicata a persone anziane, infatti con l'avanzare dell'età le persone iniziano a perdere stabilità e forza, provocando possibili cadute che possono essere molto pericolose per pazienti in età avanzata, è stato dimostrato come l'utilizzo delle vibrazioni meccaniche sui muscoli dei pazienti porti ad un miglioramento del controllo motorio, causato da una stabilità articolare migliore e co-contrazioni ridotte, si riesce così a realizzare un protocollo per diminuire le cadute negli anziani e di migliorarne la deambulazione.

### **3.4 VIBRAZIONI SUL SISTEMA ORMONALE**

La vibrazione come appena visto porta dei vantaggi al sistema neuro-muscolare, tuttavia, presenta benefici anche su altri sistemi come su quello ormonale.

Infatti, la stimolazione meccanica è in grado di provocare una risposta adattiva del sistema ormonale, portando l'aumento di testosterone e di ormone della crescita e diminuendo il cortisolo, inducendo anche un aumento della forza esplosiva, forza massima, potenza, elasticità e resistenza.<sup>34</sup>

Si aumenta la produzione anche di altre sostanze, come la serotonina, un'ammina che ha tra le varie caratteristiche quella di essere un ottimo vasocostrittore, inoltre causa l'aggregazione delle piastrine inducendo la stimolazione dei vasi.

È importante sottolineare che l'eccitazione vibratoria è in grado di aumentare la produzione di neurotrofine, di cui fa parte anche il fattore di crescita nervoso (NGF), proteina coinvolta nello sviluppo del sistema nervoso.

### **3.5 NERVE GROWTH FACTOR**

Il fattore di crescita nervoso o nerve growth factor (NGF) è una proteina composta da due catene formate da 118 amminoacidi, è coinvolta nello sviluppo del sistema nervoso e ha diversi compiti:

- evita l'apoptosi cellulare, cioè garantisce la sopravvivenza della cellula impedendo il fenomeno di morte controllata indotta dal SNC

- garantisce la differenziazione cellulare
- Azione tropica, che consente la crescita di fibre nervose in direzione della maggior concentrazione di NGF, induce quindi una proliferazione dei neuroni portando ad una maggiore densità nervosa.

Sono stati effettuati alcuni studi sui topi riguardanti una correlazione tra NGF e forza meccanica, in particolare si andava ad analizzare il tessuto cicatrizzato indotto da una forza meccanica direttamente su una ferita, si è notato come il tessuto della cicatrice ipertrofica indotta da una stimolazione meccanica ha una densità di nervi superiore al caso in cui non sia presente la sollecitazione, densità dovuta da un maggior livello di NGF nel tessuto.<sup>35-37</sup>

### **3.6 VIBRAZIONE SUL SISTEMA MUSCOLO SCHELETRICO**

Un periodo di immobilizzazione o un periodo prolungato a letto, porta a un indebolimento del sistema muscolo-scheletrico e in particolare porta atrofia muscolare, ovvero il riassorbimento del muscolo. Ciò è causato dal fatto che in tali periodi viene meno il carico minimo sufficiente a mantenere in salute il sistema muscolo-scheletrico, per ovviare a questo problema si è notato come le vibrazioni meccaniche ad alta intensità portino numerosi benefici alla struttura ossea, muscolare e articolare diminuendo la perdita ossea e di tono muscolare. Le vibrazioni meccaniche vengono applicate direttamente sul muscolo, in maniera tale da andare ad eccitare dei recettori chiamati fusi muscolari, bisogna eccitare a frequenze intorno ai 40Hz, questo fenomeno prende il nome di riflesso tonico di vibrazione (RTV).<sup>38</sup>

### **3.7 VIBRAZIONE SUL TESSUTO OSSEO**

Il tessuto osseo è un tessuto in continuo cambiamento come si può osservare dal fenomeno di rimodellamento osseo che avviene quando una parte di tessuto non viene più stimolata con la stessa intensità, oppure a quando è presente una frattura e si deve instaurare un processo di guarigione. Tali processi sono causati da cellule chiamate osteoclasti e osteoblasti che grazie alla loro collaborazione di smantellamento e ricostruzione riescono a produrre e a modificare la matrice ossea, in particolare gli osteoblasti sono dotati di meccanorecettori e che quindi li rendono sensibili alle vibrazioni meccaniche, vibrazioni che sono in grado di velocizzare e migliorare il processo di osteogenesi portando alla formazione di nuovo osso ed è in grado di contrastare anche patologie come l'osteoporosi.<sup>39</sup>

Quindi con la vibrazione non solo si diminuisce la perdita ossea, ma si favorisce anche la generazione di nuovo tessuto, porta quindi numerosi benefici a pazienti con patologie come l'osteoporosi, malattia in cui per evitare la perdita di matrice ossea è obbligatorio l'esercizio fisico, il problema è che è una malattia che colpisce principalmente gli anziani e che quindi avrebbero molte difficoltà nell'esecuzione degli esercizi, esercizi che possono essere ridotti di molto o addirittura eliminati se si utilizza una terapia vibrazionale meccanica in grado di velocizzare la guarigione della frattura.

### **3.8 VIBRAZIONE SULL'OBESITA' E OSTEOPOROSI**

La vibrazione meccanica è in grado di stimolare delle cellule staminali in particolare le mesenchimali pluripotenti, cellule adulte, immature e indifferenziate che sono in grado di generare l'osteoblastogenesi e l'adipogenesi, permettendo così la formazione di osteoblasti e adipociti, per tanto l'eccitazione meccanica a bassa intensità di tale cellula permette di sopprimere la crescita di grasso subcutaneo e viscerale favorendo la crescita ossea, fornendoci delle armi non invasive contro l'obesità e l'osteoporosi.<sup>40</sup>

### **3.9 VIBRAZIONE SULLA TERAPIA DEL DOLORE**

Sono stati riscontrati effetti benevoli della vibrazione anche nel campo antalgico, infatti l'eccitazione ha un effetto neurofisiologico di tipo spinale, come dimostra la rapida scomparsa del dolore con però un rapido declino dell'effetto antalgico. Tipicamente le vibrazioni vengono utilizzate per dolori encefalici, muscolo scheletrici o patologie particolari originarie del sistema nervoso come la lombalgia. Sono stati studiati diversi protocolli dalla durata variabile dai 5 ai 30 minuti inducendo una riduzione del dolore anche per 5 ore, la frequenza di stimolazione è sempre sui 100Hz mentre per quanto riguarda il punto di erogazione deve essere applicata direttamente sulla zona dolorante.<sup>41</sup>

### **3.10 VIBRAZIONE SULLA CIRCOLAZIONE SANGUIGNA**

Esami doppler hanno dimostrato come la vibrazione meccanica induce un aumento della circolazione sanguigna, portando ad una riduzione dell'indice di resistenza e inducendo quindi un aumento della velocità media all'interno dei vasi, non è ancora chiaro se questo aumento sia legato semplicemente a una dilatazione dei vasi, poiché la velocità massima non ha subito modifiche.<sup>42</sup>

Un miglioramento del flusso può portare diversi benefici sul metabolismo poiché ci sarà un maggiore apporto di ossigeno ai tessuti provocando una diminuzione della pressione arteriosa.

## 4. SOLETTA VIBRANTE

Come analizzato nel capitolo precedente, sono numerosi i vantaggi che possono portare le vibrazioni meccaniche, in particolare ci hanno colpito diversi studi riguardanti stimolazioni alle piante dei piedi, studi che hanno portato conclusioni interessanti come quelli di Jennefer B.J.Zwaferink riguardanti una stimolazione sottosoglia alla pianta del piede.<sup>43</sup>

La soglia di sensibilità al tatto alla pianta del piede è un parametro fondamentale per alcune patologie come per il diabete, infatti il diabete mellito ha come complicanza un danneggiamento dei nervi periferici a causa dell'alto livello di glucosio nel sangue, danneggiamento che porta a una perdita di sensibilità plantare causando una deformazione anatomica del piede e quindi una distribuzione dei carichi non più fisiologica, con zone ad alta sollecitazione che possono provocare delle ulcere. Il grosso problema è che non avendo più sensibilità il paziente non è in grado di percepire l'ulcera e che quindi se trascurata per molto tempo causa infezioni, che portano alla necrosi dei tessuti e nel peggiore dei casi alla perdita dell'arto da parte del paziente.

Si è notato come, una stimolazione meccanica sottosoglia diretta sulla pianta del piede, sia in grado di migliorare la sensibilità riducendo il valore di soglia quindi riuscire a fare prevenzione per ulcere causate da neuropatia diabetica.

Una stimolazione sottosoglia della pianta del piede è stata al centro anche degli studi di Attila A. Priplata e il suo team di ricercatori, che utilizzando un fenomeno chiamato risonanza stocastica ovvero la capacità di un segnale rumoroso, in questo caso di tipo meccanico, di amplificare un segnale debole causato da un danneggiamento delle vie sensoriali a causa di un ictus, amplificazione del segnale sensoriale che porta quindi a un miglioramento netto della stabilità del paziente portato da una riduzione delle oscillazioni.<sup>44</sup>

Uno studio particolarmente interessante è stato quello di Fabrizio Stocchi e il suo team, in cui hanno analizzato l'effetto di una stimolazione meccanica automatizzata applicata alle piante dei piedi in pazienti affetti da Morbo di Parkinson. Tale eccitazione interagisce con i meccanorecettori portando numerosi effetti benefici, infatti si ottiene un miglioramento della velocità di camminata, un aumento della lunghezza del passo e quindi anche una maggior stabilità nella camminata.<sup>45</sup>

A seguito di questi benefici indotti nei pazienti, sia per quanto riguarda un miglioramento della sensibilità, sia per un miglioramento nella deambulazione e nell'equilibrio dei pazienti affetti da



patologie o da persone anziane, in collaborazione con l'AZIENDA OSPEDAL.SS.ANTONIO BIAGIO ARRIGO abbiamo deciso di progettare e realizzare un prototipo di un sistema di stimolo dell'apparato nervoso per pazienti affetti da malattie degenerative, che verrà poi testato sperimentalmente sui pazienti stessi per osservare gli eventuali benefici.

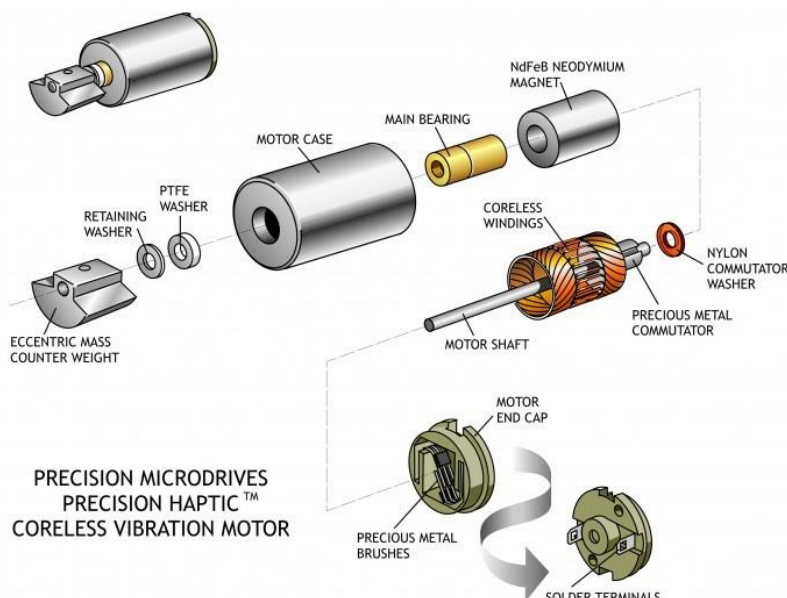
Sotto la stretta collaborazione del medico, si è deciso di eccitare le piante del piede con una vibrazione puramente meccanica e solidale con la scarpa su un range di frequenze che varia da 50Hz a 150Hz, si è scelto tale range poiché la frequenza di eccitazione del corpuscolo del Pacini è intorno ai 100Hz e si vuole valutare sperimentalmente se determinati pazienti rispondono in maniera migliore a determinate frequenze. Un ulteriore feature del plantare vibrante da noi progettato consiste nell'andare a vibrare solamente quando il piede è appoggiato per terra, quindi durante la camminata solamente l'arto in appoggio sarà stimolato mentre l'arto in pendolamento non verrà sollecitato.

La soletta da noi progettata è una struttura in lamiera piegata per ottenere una forma tale da poter essere inserita in una scarpa, scarpa che poi verrà utilizzata dal paziente per compiere determinati movimenti. All'interno della lamiera è presente tutto il circuito elettronico e i sensori che si occupano di pilotare il motore che porta alla generazione delle vibrazioni.

## 4.1 COME GENERARE VIBRAZIONI MECCANICHE

Prima di iniziare a parlare del dispositivo bisogna fare una premessa, bisogna innanzitutto capire come si possono generare le vibrazioni meccaniche, esistono diversi modi per ottenerle e si dividono in base al principio utilizzato.

### 4.1.1. Motorino a massa eccentrica rotante (erm)



Questa tipologia di motorino molto utilizzata negli scorsi decenni sfrutta la rotazione di una massa eccentrica, rotazione che genera una forza centripeta ( $F_c$ ) in grado di far muovere il motore generando la vibrazione meccanica. <sup>46</sup>

Queste tipologie di motorini, tipicamente in commercio vengono venduti sulla base della loro velocità angolare espressa in giri al minuto (rpm), che però non fa parte del sistema internazionale delle unità di misura, per tanto se volessimo sapere la pulsazione di rotazione ( $\Omega$ ) in rad/s bisogna:

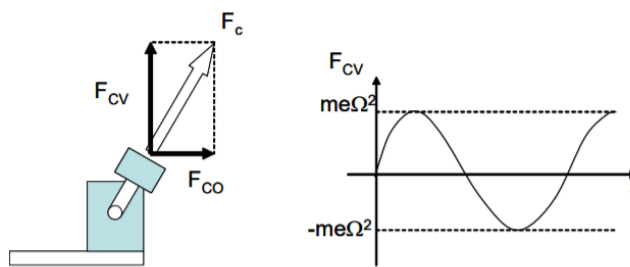
$$n = \frac{rpm}{60} \quad \text{ottenendo così la velocità angolare } n \text{ in (Hz)}$$

Successivamente bisogna moltiplicare  $n$  per  $2\pi$  ottenendo la velocità angolare in rad/s

$$\Omega = 2n\pi$$

L'ampiezza della forzante in Newton può quindi essere ottenuta con la seguente formula

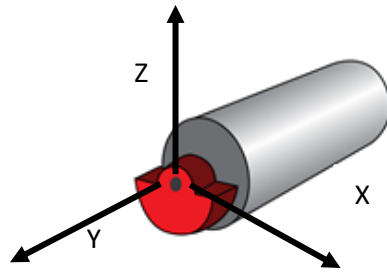
$$F = \Omega^2 em$$



*Risultante della forza sulla massa e andamento della forza nel tempo*

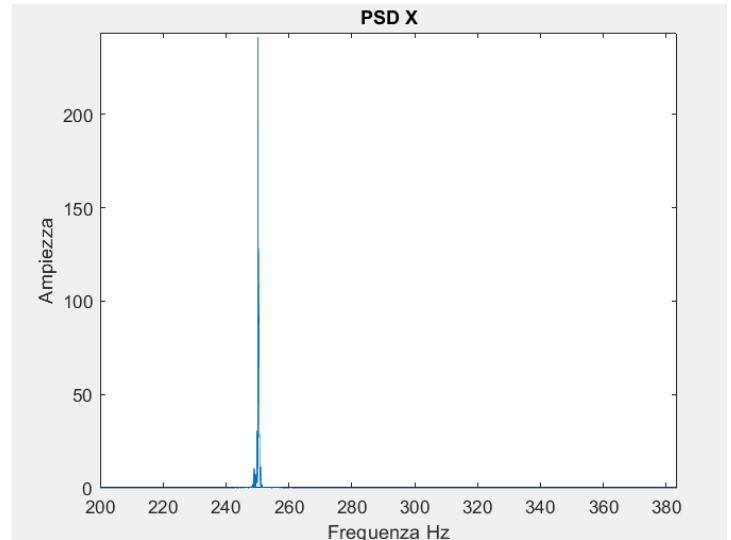
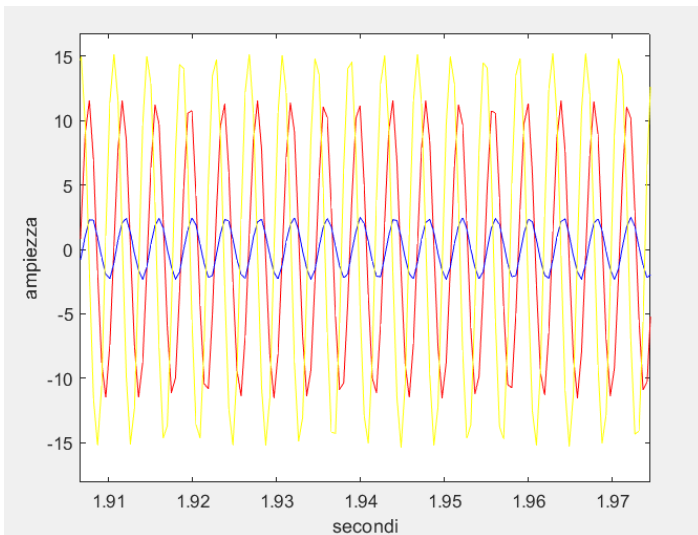
Dove  $m$  (kg) è la massa eccentrica del motorino ed  $e$  è la distanza (in metri) della massa dall'asse di rotazione. Come si può facilmente notare da quest'ultima formula, a parità di massa e di distanza dall'asse la forza sarà proporzionale al quadrato della velocità angolare.

Ovviamente, poiché la vibrazione è causata dalla forza centripeta, forza che è bidimensionale se consideriamo un sistema di riferimento solidale con l'asse di rotazione del motore, la propagazione delle vibrazioni avviene principalmente lungo due assi come si può notare da un'analisi di un motorino di questa tipologia con un accelerometro piezoelettrico.



Dai seguenti grafici si nota come l'ampiezza della vibrazione lungo Y (colore blu), ovvero la direzione dell'asse del motorino è quella più bassa, infatti le vibrazioni principali sono quelle lungo X (colore rosso) e Z (colore giallo) con un'ampiezza maggiore di quest'ultima.

Inoltre, si può notare dalla densità spettrale di potenza (PSD) come il motorino in questione abbia frequenze intorno ai 250Hz ciò significa che ha una velocità angolare di 15000rpm.

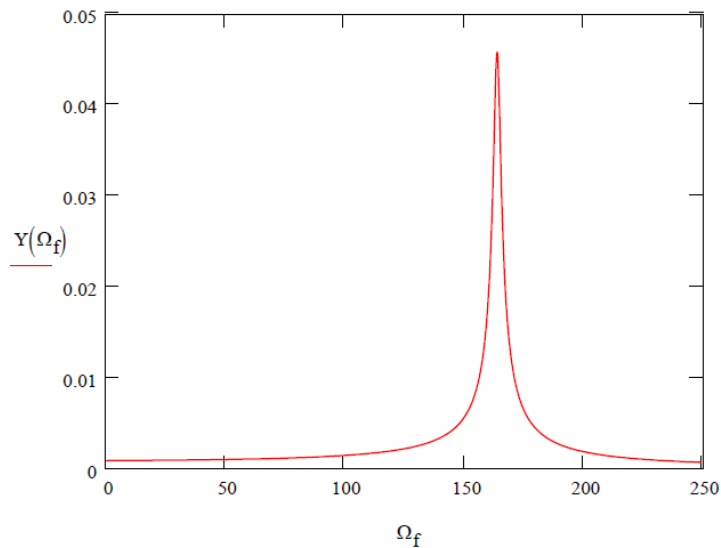


Un altro parametro che può essere calcolato è l'ampiezza dell'oscillazione della massa Y (valutata in metri) che si ottiene dalla seguente formula

$$Y = \frac{F}{K} * \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\Omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

Dove  $\zeta$  indica lo smorzamento del sistema,  $k$  la rigidità e  $\omega_n$  la pulsazione propria del sistema.

Grazie a questi valori si può graficare l'andamento dell'ampiezza dell'oscillazione in funzione della frequenza di eccitazione, che è molto utile per legare l'intensità della vibrazione con la velocità angolare del motorino. <sup>47</sup>



Esempio di grafico ottenuto con valori simbolici di:

$$\omega_n = 160 \frac{rad}{s}$$

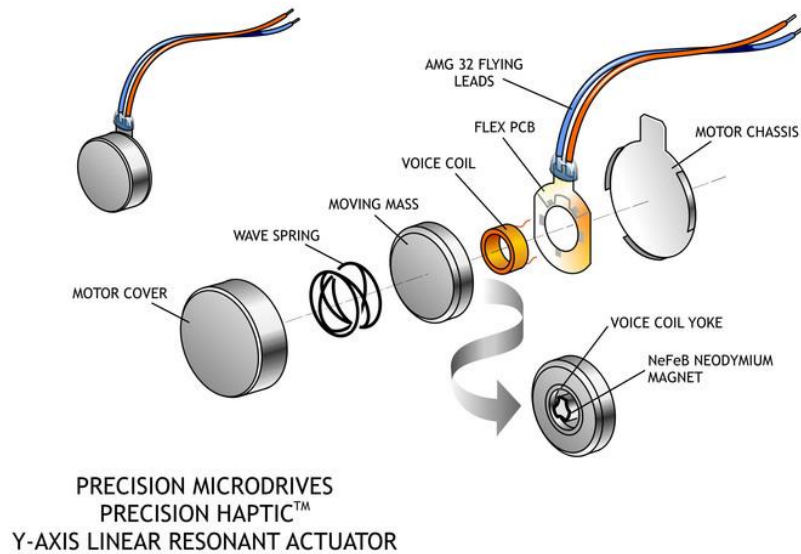
$$F = 120 N$$

$$\zeta = 0,01$$

Come si può notare l'andamento presenta sempre un massimo di ampiezza in quando la pulsazione della forza eccitante vale:

$$\Omega_f = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

### 4.1.2. Attuatore lineare risonante (LRA)



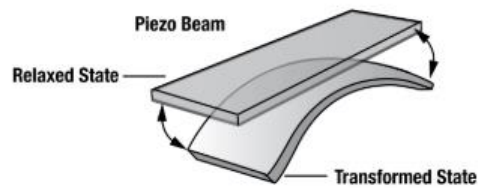
L'attuatore lineare risonante è costituito da un magnete attaccato a una molla, circondato da una bobina e racchiuso all'interno di un alloggiamento. La massa muovendosi linearmente avanti e indietro dentro la bobina elettromagnetica genera la vibrazione. A differenza dei motori precedenti gli LRA consumano meno energia e hanno un tempo di risposta più rapido, inoltre permettono un controllo dell'ampiezza del segnale in input, il grosso limite però è che se utilizzati a frequenze fuori dalla banda di risonanza c'è un drastico calo delle prestazioni e dell'efficienza.<sup>48</sup>

### 4.1.3. Attuatori piezoelettrici



Gli attuatori piezoelettrici sono realizzati con cristalli che sfruttano l'effetto piezoelettrico, ovvero la capacità di contrarsi ed espandersi qualora il cristallo subisse una variazione di potenziale, generando così una vibrazione meccanica molto localizzata. Sono motori molto più precisi di quelli visti in precedenza poiché sono in grado di vibrare su un ampio range di frequenze ed è inoltre possibile

controllare direttamente l'ampiezza del segnale, di contro però questi cristalli sono molto costosi e fragili e inoltre consumano molta energia per questi motivi oggi non sono usati moltissimo. <sup>49</sup>



*Effetto Piezoelettrico dell'attuatore*

## 4.2. CONCEPT

La soletta progettata stimolerà la pianta del piede solamente quando quest'ultimo è a contatto con il terreno, tale condizione la possiamo verificare mediante un estensimetro, cioè quando la scarpa sarà a contatto con il terreno, la soletta subirà una deformazione, deformazione che verrà misurata da un estensimetro in termini di variazione di potenziale provocando lo sbilanciamento di un ponte di Wheatstone. Il potenziale in uscita dal ponte viene amplificato da un amplificatore (AMP04 FPZ) con guadagno selezionabile mediante un potenziometro, una volta amplificato il segnale verrà comparato all'interno del trigger di Schmitt con una tensione soglia pari a 0V, ovvero il valore che dovrebbe avere il ponte quando non abbiamo una deformazione, le uscite del trigger saranno utilizzate per comandare il treno di onde prodotte dal NE555, responsabile della rotazione del motorino e quindi di conseguenza della vibrazione. Inoltre, attraverso un sistema di modulazione di larghezza d'impulso (PWM) è possibile variare la velocità di rotazione del motore e quindi permette al motorino di emettere vibrazioni a diverse frequenze.



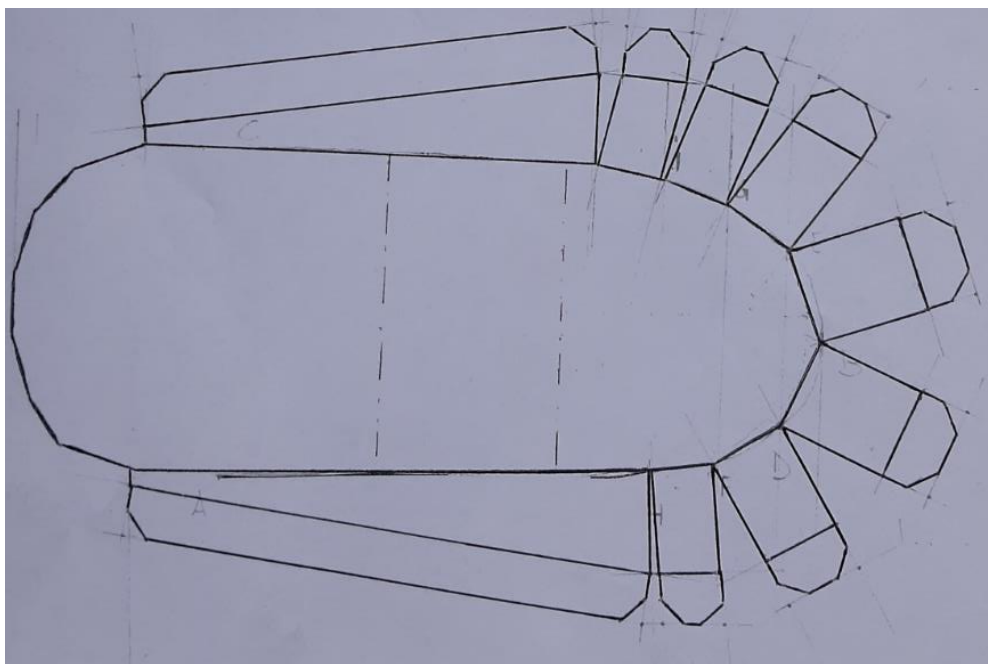
Tutta la parte circuitale verrà inserita all'interno di una struttura metallica appositamente creata, che a sua volta per poter erogare la terapia al paziente è inserita all'interno di una scarpa commerciale, il dispositivo realizzato è visibile nella precedente foto.

Il materiale utilizzato per la realizzazione è un acciaio strutturale laminato a caldo, che prende il nome di S235 dove 235 indica il limite di snervamento in MPa, prima dell'entrata in vigore dell'attuale normativa EN10025 veniva chiamato Fe 360 dove 360 in Mpa indicava il valore di tensione a rottura. È un acciaio a basso contenuto di carbonio (C) infatti è un acciaio semidolce ( $0,15\% < C < 0,25\%$ ) e pertanto presenta un'elevata duttilità che gli permette di essere lavorato per piegatura, inoltre a causa del suo livello di carbonio presenta una resistenza meccanica buona ma non troppo elevata.

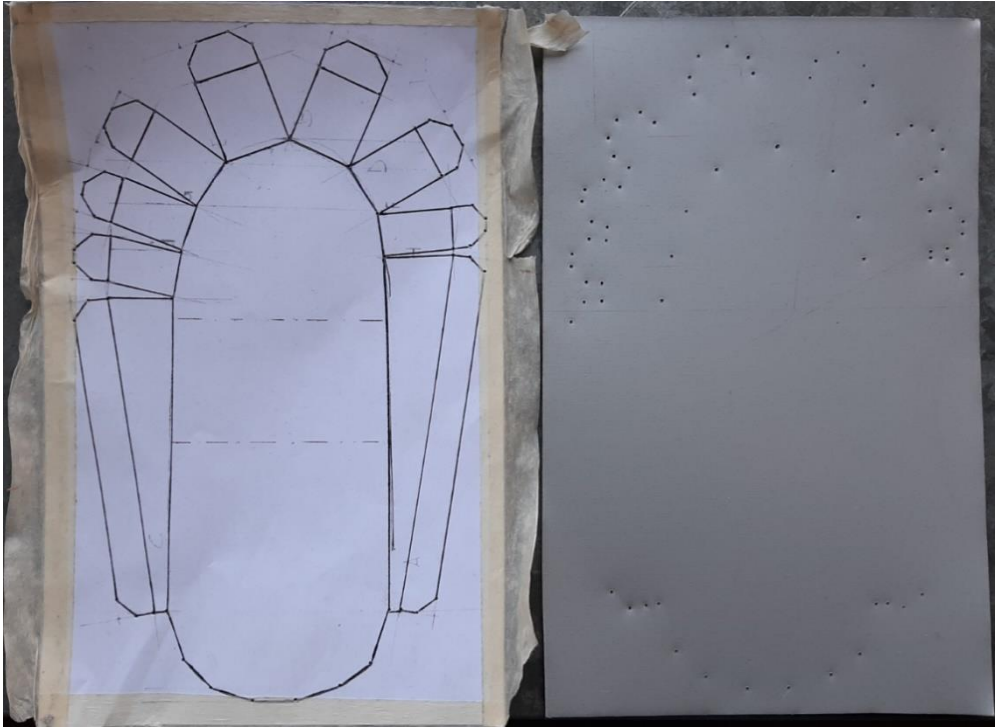
La composizione chimica indicata nella normativa è la seguente:

C%	Mn%	P%	S%	N%	Cu%
Da 0,15 a 0,25	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55

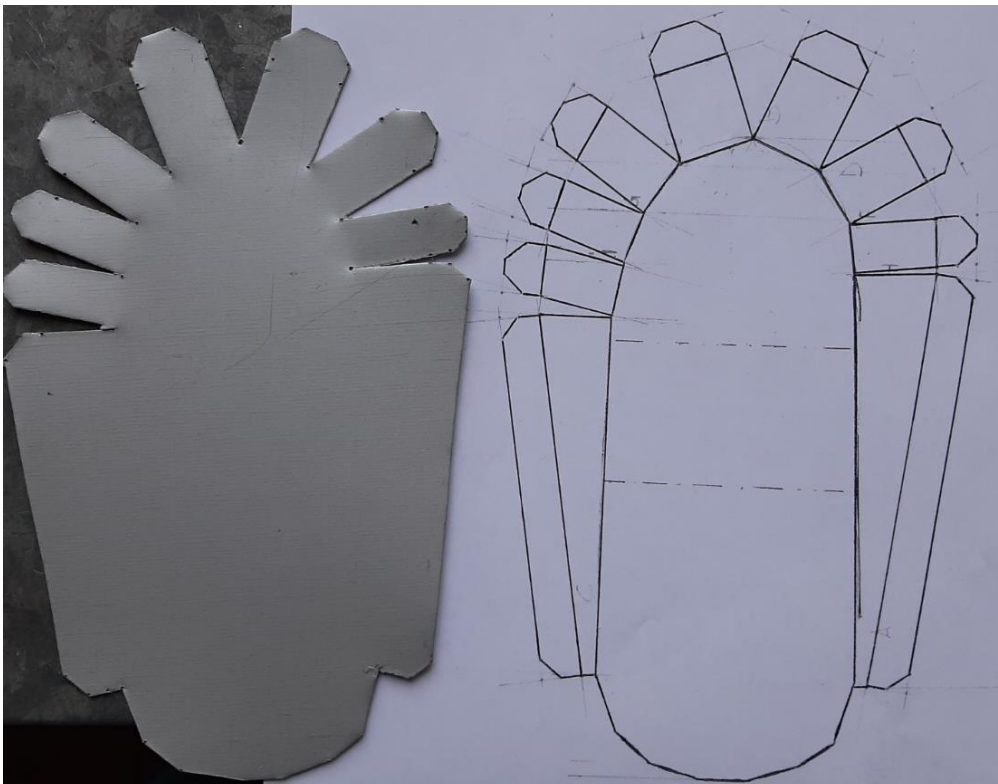
Il primo passaggio per la realizzazione della struttura è quello di disegnare la sagoma del plantare con il relativo diagramma delle altezze, nell'immagine sottostante è rappresentata una delle sagome da noi utilizzata.



Effettuata la sagoma si passa a lavorare sulla lamiera utilizzando il disegno realizzato come maschera, applicandolo direttamente sulla lamiera e andando a colpire con un punteruolo i punti più interessanti della sagoma ottenendo così una riproduzione dei punti fondamentali sulla lamiera che ci permetteranno di ricostruire il disegno sulla lamiera.

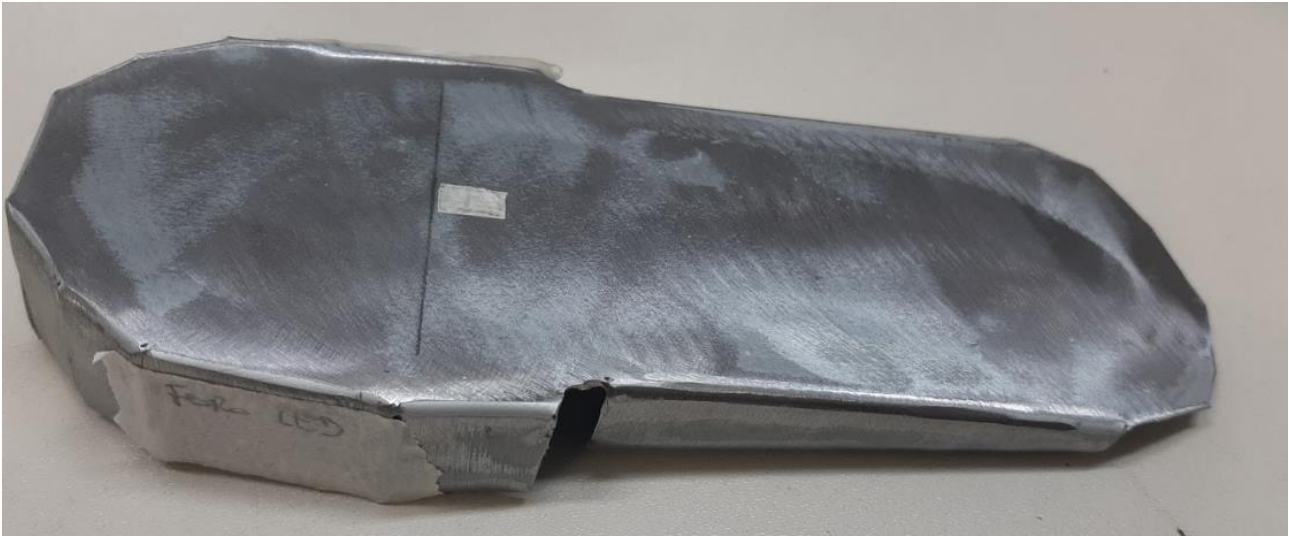


Dalla trasposizione dei punti salienti sulla lamiera con delle apposite cesoie si ritaglia ottenendo la forma finale del plantare.





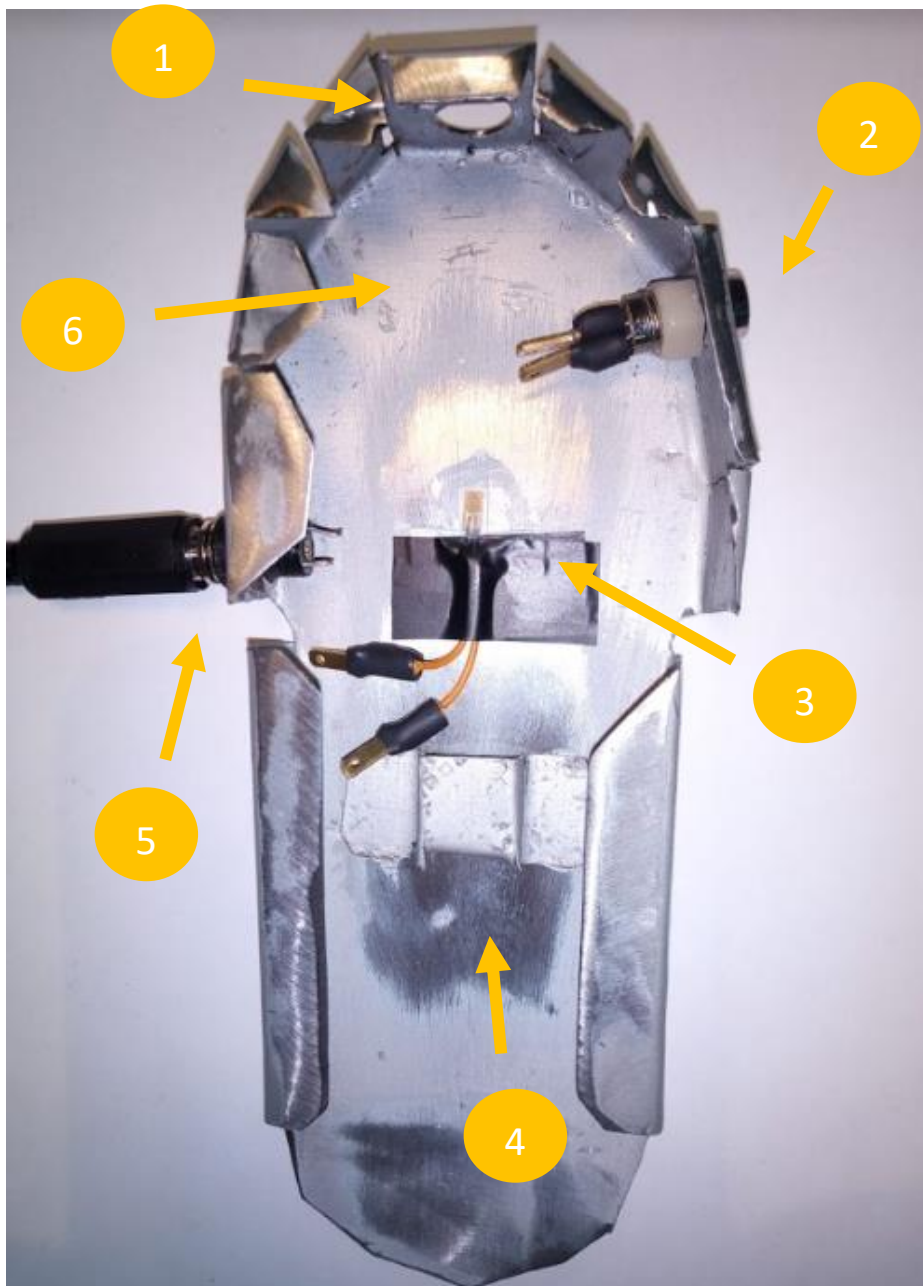
Questo prodotto può ora essere processato tramite piegatura, effettuando diverse pieghe a 90° si ottiene la forma finale della soletta vibrante, che verrà successivamente inserita all'interno di una scarpa.



La foto soprastante, raffigura lo stato della struttura post piegatura, da tale condizione per ottenere la forma finale bisogna ancora effettuare ancora alcune modifiche:

- Effettuare tre fori di diverso diametro:
  1. Foro da 10mm per permettere il passaggio del potenziometro, che regola la frequenza di vibrazione del motorino
  2. Foro da 8mm per consentire la ricarica, infatti uscirà il jack femmina da 5,5mm per permettere la ricarica delle batterie
  3. Foro da 8 mm per consentire l'uscita del led di segnalazione di attivazione del circuito
  4. Piccolo foro per consentire la regolazione del guadagno dell'amplificatore tramite il potenziometro 2
  5. Piccolo foro per permettere il bilanciamento del ponte di Wheatstone tramite la regolazione del potenziometro 1
  6. Piccolo foro per permettere lo switch del deviatore, permette quindi di passare dalla modalità di ricarica a quella di funzionamento e viceversa.
  
- Applicare estensimetro nella zona d'interesse in maniera tale che subisca delle deformazioni tali da attivare il motorino
  
- Realizzare struttura di sostegno del motorino e applicarlo alla struttura

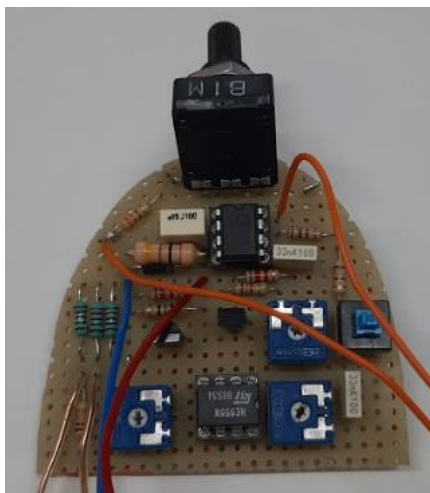
Tutte queste modifiche possono essere osservate nella successiva immagine



1. Foro del potenziometro
2. Foro del Led
3. Estensimetro
4. Struttura sostegno motorino

5. Foro Jack 5,5mm

6. Zona in cui verrà inserito il circuito della soletta saldato su una basetta millefori



Per ottenere una struttura metallica più comoda e confortevole, viene incollata una parte gommosa all'estremità, permettendo inoltre all'intera struttura di essere inserita più facilmente nella scarpa, la versione finale della soletta vibrante che verrà inserita è raffigurata nella seguente immagine.

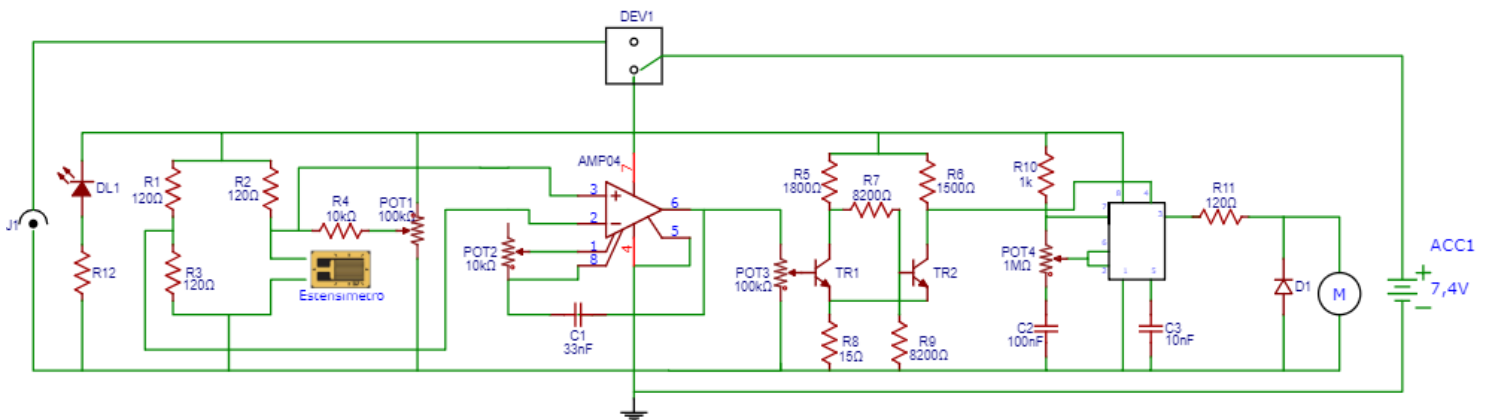


Ottenuto il dispositivo in figura, bisogna inserire la soletta vibrante all'interno della scarpa per permettere la corretta erogazione della terapia sul paziente.

La scarpa commerciale utilizzata è stata anch'essa forata per permettere la regolazione della frequenza di vibrazione, la ricarica delle batterie e la visualizzazione del led di attivazione senza rimuovere la soletta dalla scarpa. Ciò è molto utile poiché permette al medico di regolare la frequenza delle vibrazioni meccaniche in maniera molto facile e immediata anche durante l'erogazione della terapia al paziente.

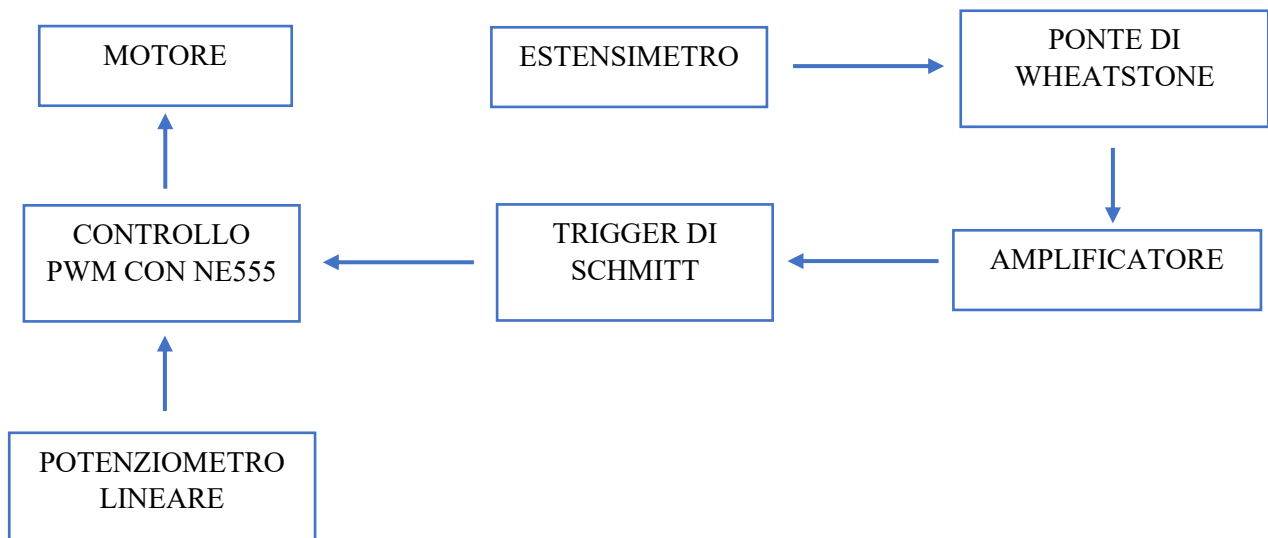
### 4.3. SCHEMA A BLOCCHI DELLA SOLETTA VIBRANTE

Descritta l'idea che sta alla base del progetto andiamo ad analizzare la parte circuitale della soletta vibrante.



Il circuito finale, sopra rappresentato, mostra l'intero progetto elettronico del dispositivo, comprensivo anche della parte di alimentazione e di ricarica.

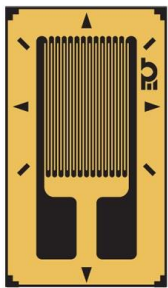
Per analizzare meglio e più nello specifico il dispositivo elettromeccanico realizzato, conviene scomporlo in diversi blocchi



- Estensimetro e ponte di Wheatstone
- Blocco d'amplificazione
- Trigger di Schmitt
- Circuito integrato (NE555) e controllo PWM
- Motorino
- Alimentazione e ricarica

#### 4.3.1. Principi di funzionamento estensimetro e ponte di Wheatstone

Gli estensimetri elettrici a resistenza, sono strumenti utilizzati per misurare una deformazione, tale



deformazione causa sull'estensimetro e in particolare sul filo metallico di cui è composto una variazione di resistenza, ma come sono legate la variazione di resistenza e la deformazione?

Come prima cosa sappiamo che la resistenza di un filo ( $R$ ) è dipendente dalla resistività del materiale ( $\rho$ ), dalla lunghezza del cavo ( $L$ ) e dall'area della sua sezione:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Applicando il logaritmo a entrambi i membri:

$$\log(R) = \log(\rho) + \log(L) - \log(A)$$

Facendo il differenziale dei logaritmi si ottiene

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

Tale equazione lega una variazione di resistenza con una variazione di altre grandezze, in particolare  $dL/L$  è la deformazione assiale ( $\epsilon_a$ ), inoltre il termine  $dA/A$  è proporzionale alla variazione di diametro  $dD/D$ , quest'ultima non è altro che la deformazione trasversale ( $\epsilon_t$ ) che si lega alla deformazione assiale mediante il coefficiente di Poisson ( $\nu$ ) quindi avremo che:

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D}$$

$$\epsilon_t = -\nu \epsilon_a$$

E quindi possiamo riscrivere la variazione di resistenza come:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_a(1 + 2\nu)$$

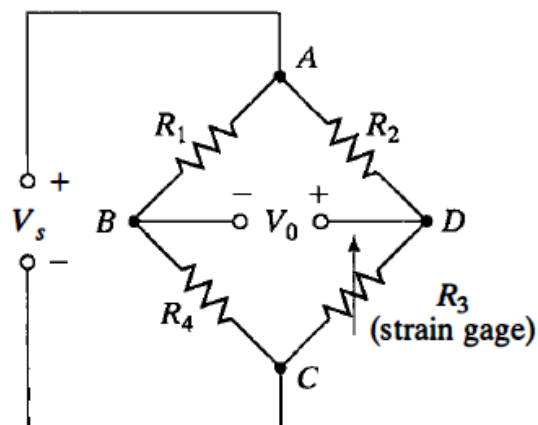
Tale equazione esprime la relazione che esiste tra variazione di resistenza, variazione di resistività e deformazione assiale, inoltre negli estensimetri viene definito un parametro molto importante chiamato Strain gage (S), tale parametro è di fatto una misura di sensibilità e può essere calcolato come:

$$S = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon_a}$$

$$S = 1 + 2\nu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon_a}$$

Se la temperatura venisse mantenuta costante, la variazione di resistività sarebbe circa proporzionale alla deformazione assiale, ottenendo così uno strain gage costante. Tuttavia, poiché sarebbe utopistico fare un'ipotesi di questo tipo, S varia in funzione della temperatura. Tipicamente estensimetri metallici come quelli utilizzati da noi hanno dei valori di S intorno al 2.

Per studiare la variazione di resistenza dell'estensimetro, si utilizza un circuito elettrico chiamato ponte di Wheatston, che ha lo scopo di fornire una tensione di output del circuito ( $V_0$ ) proporzionale alla variazione di resistenza dell'estensimetro. Sono presenti tre resistenze di uguale valore ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_4$ ) e una quarta resistenza  $R_3$  (resistenza fornita dall'estensimetro) che inizialmente, quando il ponte è bilanciato, presenta una resistenza di valore uguale alle altre tre, mentre quando l'estensimetro si deforma si ottiene una variazione di resistenza che porta a uno sbilanciamento del ponte ottenendo una  $V_0$  non più nulla.



Da un punto di vista analitico si ottiene:

$$I_{ABC} = \frac{V_S}{R_1 + R_4}$$

$$I_{ADC} = \frac{V_S}{R_2 + R_3}$$

$$V_B - V_C = I_{ABC} R_4$$

$$V_D - V_C = I_{ADC} R_3$$

$$V_0 = V_D - V_B = \frac{V_S R_3}{R_2 + R_3} - \frac{V_S R_4}{R_1 + R_4}$$

$$V_0 = \frac{V_S (R_3 R_1 - R_4 R_2)}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$

La tensione appena ottenuta è la tensione in uscita dal ponte di Wheatstone ( $V_0$ ), tale tensione è proporzionale alle resistenze e alla tensione di alimentazione ( $V_S$ ) del ponte, quando l'estensimetro non è deformato  $V_0$  a ponte bilanciato vale zero, per tanto la condizione per avere una tensione nulla è la seguente:

$$(R_3 R_1 - R_4 R_2) = 0$$

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} = \alpha$$

Usando  $\alpha = 1$  e quindi tutte le resistenze come lo stesso valore avremo la condizione con maggiore sensibilità.

$$R_1 = \frac{R_4 R_2}{R_3}$$

Nel caso in cui l'estensimetro sia deformato, la sua resistenza subirà una variazione, ottenendo quindi un nuovo valore di  $R_3 = R_3 + \Delta R_3$  la nuova espressione di  $V_0$  sarà:

$$V_0 = V_S \frac{R_3 R_1 + \Delta R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3 + \Delta R_3)(R_1 + R_4)}$$

Il  $\Delta R_3$  al denominatore può essere trascurato poiché sarà molto piccolo in confronto agli altri valori di resistenza, inoltre imponendo la condizione di bilanciamento del ponte vista in precedenza l'equazione della tensione di output può essere riformulata così:

$$V_0 = V_S \frac{\Delta R_3 R_1}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}$$

$$V_0 = V_S \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)$$

La tensione di output appena ottenuta fa riferimento a un ponte di Wheatstone che presenta un solo estensimetro, prende il nome di ponte di Wheatstone a  $\frac{1}{4}$  di ponte, per ottenere un miglioramento della sensibilità bisogna inserire gli estensimetri anche sugli altri rami in maniera tale da ottenere un half bridge (1/2 ponte) o un full bridge portando a un miglioramento della sensibilità pari rispettivamente al doppio e a 4 volte rispetto la condizione a  $\frac{1}{4}$  di ponte.

- $\frac{1}{4}$  di ponte  $V_0 = V_S \frac{\alpha}{(1+\alpha)^2} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)$

- $\frac{1}{2}$  di ponte con il secondo estensimetro posizionato su  $R_1$

$$V_0 = V_S \frac{\alpha}{(1+\alpha)^2} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_1}{R_1} \right)$$

- Full bridge  $V_0 = V_S \frac{\alpha}{(1+\alpha)^2} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$

Inoltre, come abbiamo già visto nelle formule precedenti una variazione di resistenza è proporzionale allo strain gage e alla deformazione assiale e considerando un'approssimazione in cui  $\Delta R = dR$

avremo che  $\frac{\Delta R}{R} = S \varepsilon_a$

Per ottenere un miglioramento della sensibilità, gli estensimetri sugli altri rami (in questo caso  $R_2$  e  $R_4$ ) non possono essere posizionati casualmente, ma devono essere messi in maniera tale da fornire una deformazione con segno opposto rispetto alla deformazione che sentono  $R_3$  e  $R_1$ , cioè spesso nelle situazioni di carico ci sono regioni simmetriche di trazione e di compressione ovvero zone in



cui avremo la stessa deformazione ma con segno opposto, per tanto per massimizzare la sensibilità dovremo posizionare due estensimetri a trazione e due in compressione.

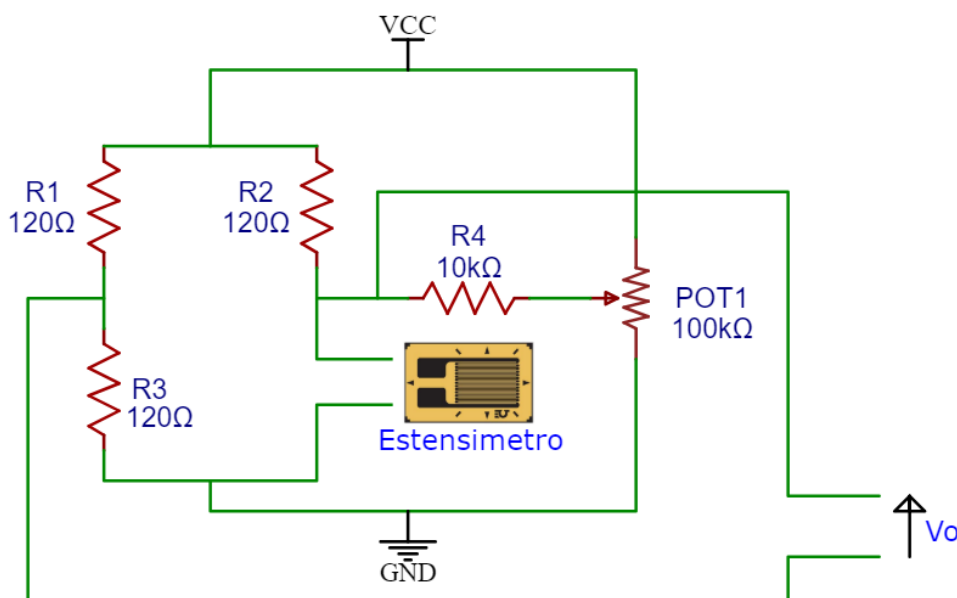
Se  $\alpha = 1$

- $\frac{1}{4}$  di ponte: 
$$V_0 = \frac{V_S}{4} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{V_S}{4} (S\epsilon_a)$$
- $\frac{1}{2}$  di ponte: 
$$V_0 = \frac{V_S}{4} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) = \frac{V_S}{4} (S\epsilon_a + S\epsilon_a) = \frac{V_S}{2} S\epsilon_a$$
- Full bridge: 
$$V_0 = \frac{V_S}{4} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{V_S}{4} (4S\epsilon_a) = V_S S\epsilon_a$$

Si ottiene un valore di tensione di output quattro volte più grande rispetto alla condizione a  $\frac{1}{4}$  di ponte, avremo così un dispositivo più sensibile e quindi a parità di deformazione fornirà in uscita tensioni maggiori.

### Circuito elettrico estensimetro e ponte di Wheatstone

La parte di circuito del dispositivo vibrante da noi progettato relativa all'estensimetro e al ponte di Wheatstone è il seguente:



Il ponte di Wheatstone quando l'estensimetro non è deformato deve avere una tensione di output ( $V_0$ ) nulla, ciò avviene solamente quando il ponte è bilanciato, per ottenere tale condizione dobbiamo utilizzare le resistenze del ponte tutte dello stesso valore  $R_1 = R_2 = R_3 = 120\Omega$ , tale condizione

è difficile che si verifichi a causa delle incertezze dei resistori (1%), per tanto per evitare di avere un errore di misura e quindi per ottenere il bilanciamento del ponte abbiamo inserito un resistore  $R_4 = 10k\Omega$  collegato ad un potenziometro multi giro orizzontale da  $100k\Omega$ , quest'ultimo componente ci permette di bilanciare manualmente il ponte, in maniera tale da fornire una tensione di output nulla quando l'estensimetro non è deformato.

Una volta che il soggetto entra in contatto il terreno, la deformazione della soletta induce una deformazione dell'estensimetro, provocando una variazione di resistenza, inizialmente l'estensimetro della RS-PRO (codice: RS 632-124) ha una resistenza nominale di  $120\Omega$ , lo sbilanciamento del ponte a  $\frac{1}{4}$  di bridge induce una variazione di potenziale che piloterà tutto il circuito, infatti qualora l'estensimetro si deformi deve indurre al motorino ad attivarsi e a generare vibrazioni.

Ora che abbiamo i valori delle resistenze e dei potenziometri utilizzati è interessante farsi un'idea degli ordini di grandezza in gioco.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 120\Omega$$

$$S = 2,05$$

Solitamente la variazione di resistenza degli estensimetri è dell'ordine di pochi ohm, ipotizzando che  $\Delta R_3 = 2\Omega$  e che la tensione di alimentazione  $V_S$  sia pari a  $7,4V$  avremo per tanto che la tensione in uscita dal ponte sarà:

$$V_0 = \frac{V_S}{4} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = 30mV$$

$$\varepsilon_a = \frac{\frac{\Delta R_3}{R_3}}{S} = 8139 \mu strain$$

Si osserva come abbiamo tensioni dell'ordine dei mV, siamo quindi in un range particolarmente critico dal punto di vista della trasmissione del segnale, a causa dei cavi. Infatti, una trasmissione di segnali a bassa tensione analogica cioè con tensioni  $<100mV$  porta a un peggioramento della qualità del segnale dovuto da campi elettromagnetici ambientali, causati da conduttori di elettricità e altre apparecchiature elettriche che possono indurre tensioni parassite nei cavi provocando una distorsione del segnale. Questo rumore che quindi viene sommato al segnale vero e proprio, è causato da accoppiamenti capacitivi o induttivi indesiderati, inoltre è presente anche un disturbo chiamato loop

di terra che porta le varie connessioni a terra a non essere più allo stesso potenziale a causa di correnti spurie.

Per ridurre il rumore nella trasmissione dei segnali a bassa tensione analogica, si sfruttano diverse soluzioni:

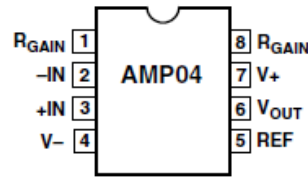
- Lunghezza cavi piccola
- Usare cavi schermati per ridurre gli effetti capacitivi
- Usare cavi intrecciati tra loro per ridurre gli effetti induttivi
- Usare un singolo collegamento a massa
- Utilizzare amplificatori con alto CMRR
- Usare alimentazione a batteria

L'amplificatore è necessario visto l'ordine di grandezza del segnale, poiché si avrebbe un rapporto segnale/rumore (SNR) troppo basso a causa delle interferenze elettromagnetiche bisogna amplificare il segnale per lavorare nel range di alta tensione (100mV-10V). Per ovviare a questo problema abbiamo utilizzato un amplificatore chiamato AMP04 che permette di selezionare un guadagno da 1 a 1000 e presenta un CMRR sufficientemente elevato, superiore a 90dB per guadagni maggiori di 100.<sup>50</sup>

#### **4.3.2. Circuito di amplificazione**

In questa sezione analizzeremo più nel dettaglio l'amplificatore e il suo circuito elettrico, l'amplificatore AMP04 della Analog Devices progettato per lavorare in un range di tensione tra i 5 e i 15V, fornisce una eccezionale compromesso fra accuratezza, consumo di energia, range d'ingresso e guadagno.

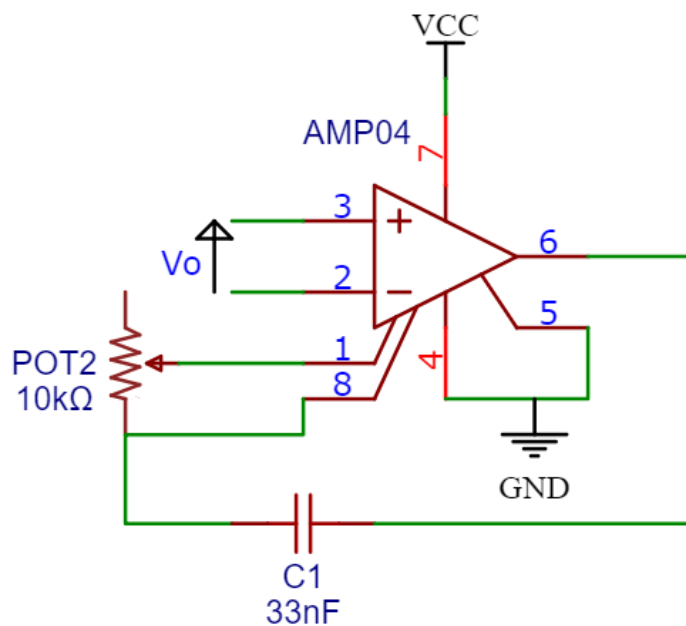
Il guadagno, non è altro che il rapporto fra il segnale in uscita dall'amplificatore e il segnale in ingresso, in questo particolare modello può essere selezionato da 1 a 1000 mediante un resistore esterno, inoltre presenta una banda molto ampia di 700kHz, la banda è un parametro molto importante di un amplificatore, poiché il guadagno non è costante su tutto il range di frequenza ma solamente in una determinata zona che prende appunto il nome di banda, se stiamo lavorando con frequenze esterne a questo intervallo avremmo delle distorsioni in frequenza del segnale.



L'amplificatore AMP04 come si può vedere dall'immagine presenta 8 pin:

- I pin 1 e 8 regolano il guadagno attraverso la presenza di un resistore esterno all'amplificatore
- I pin 2 e 3 ricevono il segnale che deve essere amplificato
- I pin 4 e 7 si occupano dell'alimentazione dell'amplificatore stesso
- Il pin 5 ha in ingresso una tensione di riferimento
- Il pin 6 è l'uscita dell'amplificatore, ovvero dove esce il segnale prelevato dai pin 2 e 3 amplificato in base al guadagno selezionato attraverso i pin 1 e 8.

Nel nostro dispositivo l'amplificatore è stato inserito nel seguente circuito



L'amplificatore viene alimentato attraverso i pin 4 e 7 ovviamente dalla stessa alimentazione del precedente blocco e che verrà analizzata più approfonditamente nei capitoli successivi. Il segnale da amplificare come già discusso non è altro che il segnale in uscita dal ponte di Wheatstone analizzato nel precedente capitolo, la tensione di output ( $V_o$ ) viene quindi prelevata attraverso i pin 2 e 3 dell'amplificatore e viene amplificata in funzione del guadagno.

In particolare, il guadagno di questo amplificatore dipende da due resistenze, la prima  $R_i$  è la resistenza interna dell'amplificatore, non può essere modificata dall'utente e in questo modello vale  $100k\Omega$ . La seconda, chiamata  $R_{gain}$  è una resistenza che viene scelta per impostare un determinato valore di guadagno, nel nostro caso abbiamo optato per utilizzare una resistenza che può essere variata infatti abbiamo utilizzato un potenziometro multi-giro da  $10k\Omega$ , avremo quindi un range di guadagno che sarà: <sup>51</sup>

$$G = \frac{R_i}{R_{gain}}$$

Avendo una resistenza di gain variabile da 0 a  $10k\Omega$ , otterremo un guadagno che sarà anch'esso variabile in un range, in particolare andrà da 10 a 1000, il limite inferiore è dato dal valore massimo di resistenza del potenziometro ( $10k\Omega$ ) mentre il limite superiore è dovuto da una limitazione dell'amplificatore stesso.

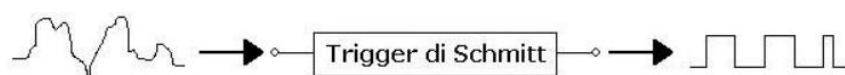
$$10 < G < 1000$$

$$V_{uscita} = GV_o$$

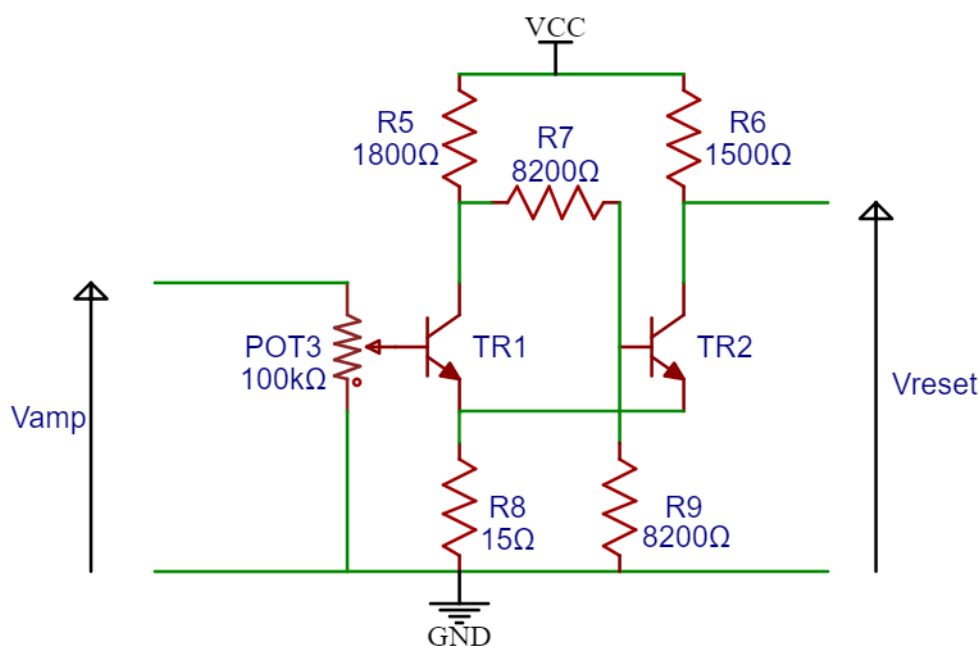
Tale range ci permette di ottenere valori di tensione in uscita dall'amplificatore dell'ordine delle centinaia di mV, permettendoci così di eliminare il problema del rumore e fornendoci dei valori di tensione adeguati a essere utilizzati nel resto del circuito.

### 4.3.3. Blocco del trigger di Schmitt

Il trigger di Schmitt è un particolare tipo di comparatore di soglia con isteresi, ovvero è un circuito che ci consente di comparare un segnale analogico in ingresso con un valore di soglia, fornendo in uscita solamente due livelli 0 e 1. Sostanzialmente qualora il segnale in ingresso sia maggiore del valore di soglia sarà 1 mentre se inferiore 0, ciò permette di trasformare un segnale analogico e sinusoidale entrante in un segnale a onde quadre. Il segnale in uscita dal trigger di Schmitt piloterà direttamente il microcontrollore NE555 attraverso il pin di RESET (pin 4), quando il segnale varrà 1 saremo in una condizione in cui ci dovrà essere l'attivazione del motorino poiché significa che abbiamo una deformazione dell'estensimetro tale da fornire una variazione di potenziale superiore al livello di soglia del trigger, d'altra parte se abbiamo una tensione sottosoglia il trigger fornirà uno stato logico 0 che indurrà il motorino a fermarsi tramite NE555.



Una configurazione tipica del trigger di Schmitt è quella con i transistor, configurazione che abbiamo utilizzato anche noi nella realizzazione del plantare il cui circuito elettrico è il seguente.

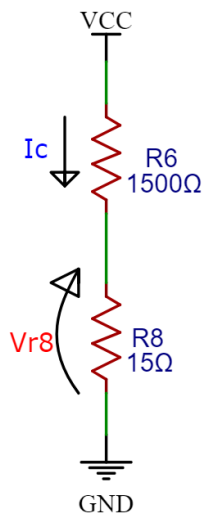


I transistor a giunzione bipolare (BJT) usati sono i BC337, il loro funzionamento in questo circuito è opposto ovvero quando il primo transistor (TR1) è in una condizione chiamata d'interdizione, ovvero condizione in cui non conduce, l'altro transistor (TR2) è in saturazione e quindi in uno stato di elevata conduzione. Il transistor TR1 percepisce sulla sua base una corrente che è proporzionale alla tensione in uscita dall'amplificatore e dalla resistenza del potenziometro (POT3). Quando l'estensimetro non è deformato, siamo nella condizione in cui il dispositivo non deve vibrare, la corrente sulla base del TR1 è nulla siccome la tensione in uscita dal AMP04 è nulla, il transistor TR1 è in uno stato di interdizione, mentre il transistor TR2 a causa dell'elevata corrente sulla base dovuto al partitore su  $R_7$  e  $R_9$  è in una condizione di saturazione. Invece, nel caso in cui avvenga uno sbilanciamento del ponte di Wheatstone, avremo una corrente sulla base di TR1 non più nulla, ma sufficientemente elevata da farlo andare in saturazione, a questo punto il transistor TR2 non avrà più una corrente tale da mantenerlo in saturazione e per tanto entrerà nella condizione di interdizione.

Da un punto di vista numerico possiamo dividere il tutto in due condizioni sulla base dello stato dei transistor, la prima avviene quando il TR1 è interdetto mentre il TR2 è in saturazione, la seconda quando il TR1 è in saturazione e il TR2 è interdetto.

- Transistor 1 interdetto e Transistor 2 in saturazione

Quando l'estensimetro non è deformato, il ponte di Wheatstone rimane bilanciato e per tanto la tensione in uscita dal ponte e di conseguenza dall'amplificatore sarà nulla. Tale tensione in ingresso al trigger di Schmitt indurrà il TR 1 a entrare in uno stato di interdizione mentre avremo che il TR2 sarà in conduzione, avremo per tanto una corrente di collettore sul trigger 2 pari a:

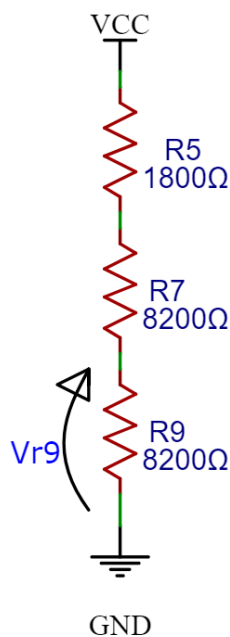


$$VCC = 7,4V$$

$$I_{c2} = \frac{VCC}{R_6 + R_8} = 4,9mA$$

$$V_{R_8} = R_8 I_c = 0,073V$$

Per mantenere il trigger 2 in una condizione di saturazione occorre che la tensione ai capi della resistenza  $R_9$  sia maggiore della somma tra la tensione su  $R_8$  e la tensione che c'è tra la base e l'emettitore del transistor ( $V_{BE} = 0,6V$ ).



$$V_{R_9min} = V_{BE} + V_{R_8} = 0,673V$$

$$V_{R_9} = \frac{VCC}{R_5 + R_7 + R_9} = 3,33V$$

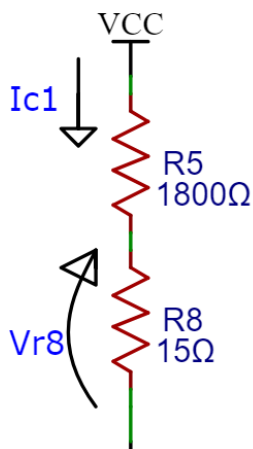
Poiché  $V_{R_9} > V_{R_9min}$  il trigger 2 sarà in una condizione di saturazione mentre il trigger 1 in una condizione di interdizione.

Il valore di soglia superiore che prende il nome di upper threshold level è il valore di tensione che bisogna mandare in ingresso al trigger per commutare il TR1 da interdetto a saturo e TR2 da saturo a interdetto è pari a:

$$UTL = V_{BE} + V_{R_8} = 0,673V$$

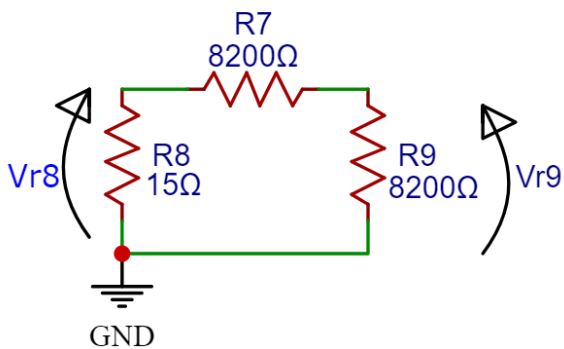
Con un valore di tensione in ingresso superiore a 0,673V avremo in uscita dal trigger il livello logico 1 che pilotando NE555 azionerà il motorino.

- Transistor 1 saturazione e Transistor 2 in interdizione



$$I_{c1} = \frac{V_{CC}}{R_5 + R_8} = 4,1mA$$

$$V_{R_8} = I_{c1} R_8 = 0,061V$$



$$V_{R_9} = \frac{V_{R_8} R_9}{R_7 + R_9} = 0,031V$$

Il transistor TR2 sarà quindi interdetto poiché la base si trova a un potenziale inferiore rispetto all'emettitore.

Il valore di soglia inferiore (lower threshold level) sarà dato da:

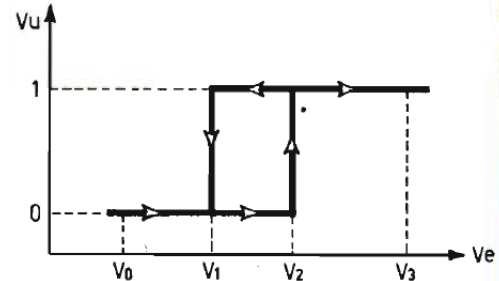
$$LTL = V_{BE} + V_{R_8} = 0,661V$$

Il trigger di Schmitt in realtà ha due soglie comparative: UTL e LTL (dove  $UTL > LTL$ ), il segnale in ingresso ( $V_{in}$ ) viene comparato con entrambe le soglie, qualora  $V_{in}$  fosse maggiore della soglia



più alta UTL (0,673V) in uscita otterremo il livello alto (1) che corrisponde al valore tensione dell'alimentatore (7,4V), mentre se  $V_{in}$  fosse minore della soglia più bassa LTL (0,661) il segnale in uscita dal trigger corrisponderebbe al livello logico 0 e quindi alla tensione di 0,073V.

Se il valore di  $V_{in}$  è compreso tra le due soglie l'uscita mantiene il livello logico precedente fino a quando la tensione d'ingresso non è tale da far avvenire il cambio, questa capacità prende il nome di isteresi. Per chiarire meglio questo comportamento osserviamo il diagramma a fianco, sull'asse delle ascisse sono presenti le tensioni in entrata ( $V_e$ ) al trigger mentre sulle ordinate la tensione di uscita ( $V_u$ ), erogando un segnale d'ingresso con ampiezza



bassa ( $V_0$ ) avremo come uscita il livello logico basso (0), aumentando tale valore fino ad un'ampiezza maggiore di UTL ( $V_2$ ) si osserva un cambiamento del livello logico che passa da 0 a 1, aumentando ulteriormente  $V_2$  fino a un valore  $V_3$  non si osservano variazioni del livello logico che rimane costante su alto, se invece decidessimo a partire da  $V_2$  di diminuire l'ampiezza, lo stato logico rimane su alto fino a quando non si raggiunge il valore  $V_1$ , che corrisponde al valore di soglia LTL, quando avremo un valore pari a  $V_1$  si osserva per tanto una variazione dello stato logico, che torna a un livello basso.<sup>52</sup>

Ricapitolando, il segnale in ingresso al trigger è il segnale in uscita dall'amplificatore che viene comparato con le due soglie, fornendo un livello logico che ne determina il valore in uscita ( $V_{reset}$ ). Possiamo ottenere quindi tre casi:

$V_{amp} > UTL$                       Livello logico 1  
→                       $V_{reset} = V_{CC} = 7,4V$

$V_{amp} < LTL$                       Livello logico 0  
→                       $V_{reset} = V_{R_8} + V_{CE_{TR2SAT}} = 0,073V$

$$LTL < V_{amp} < UTL$$

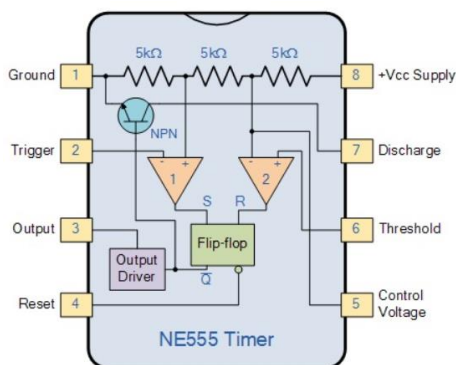


Per il fenomeno di isteresi in questa condizione il livello logico e quindi il valore di  $V_{reset}$  rimane costante fino a quando  $V_{amp}$  non raggiunge un'ampiezza tale da soddisfare una delle due condizioni precedenti portando a una variazione del livello logico.

#### 4.3.4. Blocco relativo al NE555 e controllo PWM

Ne555 è un circuito integrato composto da 8 pin che può essere utilizzato in tre differenti configurazioni:

- Monostabile, configurazione in cui il circuito funziona con un singolo impulso di trigger
- Astabile, l'NE555 lavora come un oscillatore
- Bistabile, l'integrato lavora come un flip-flop

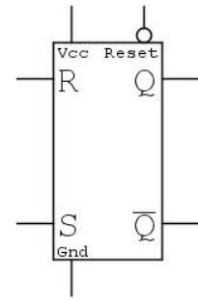


L'NE555 è composto da diversi componenti elettronici che realizzano un vero e proprio circuito, ciò è facilmente visibile osservando lo schema a blocchi soprastante. In particolare, sono presenti tre resistenze da  $5k\Omega$  da cui deriva il nome dell'integrato, due amplificatori operazionali, il circuito flip/flop che consente di passare dalla modalità set a reset e viceversa e infine un transistor npn con la sua resistenza.

Le tre resistenze poste tra VCC e terra fanno un partitore suddividendo la tensione in  $2/3$  di VCC sull'ingresso - di OP2 e di  $1/3$  sull'entrata + di OP1, tali operazionali funzionano come dei

comparatori, sfruttando come soglia di comparazione proprio la frazione della tensione di alimentazione.

Prima di procedere con un esempio pratico analizziamo il blocco flip flop più nel dettaglio, questo blocco è composto da due pin connessi rispettivamente all'alimentazione e a terra, due pin d'entrata S (set) e R (reset), due pin d'uscita  $Q$  e  $\bar{Q}$ .



Il funzionamento del flip/flop rappresentato a fianco è il seguente, una volta alimentato il blocco e portata una tensione in ingresso a S si attiva la sua uscita  $Q$ , andando al livello alto ovvero alla tensione di alimentazione VCC. Una caratteristica importante del flip/flop è che l'uscita rimane costante anche se viene rimossa la tensione in ingresso a S, per poter resettare l'uscita e quindi tornare a un livello basso ovvero alla tensione di terra, bisogna mandare una tensione sull'ingresso R, e quindi un funzionamento del tipo on/off a seconda dell'ingresso attivato.

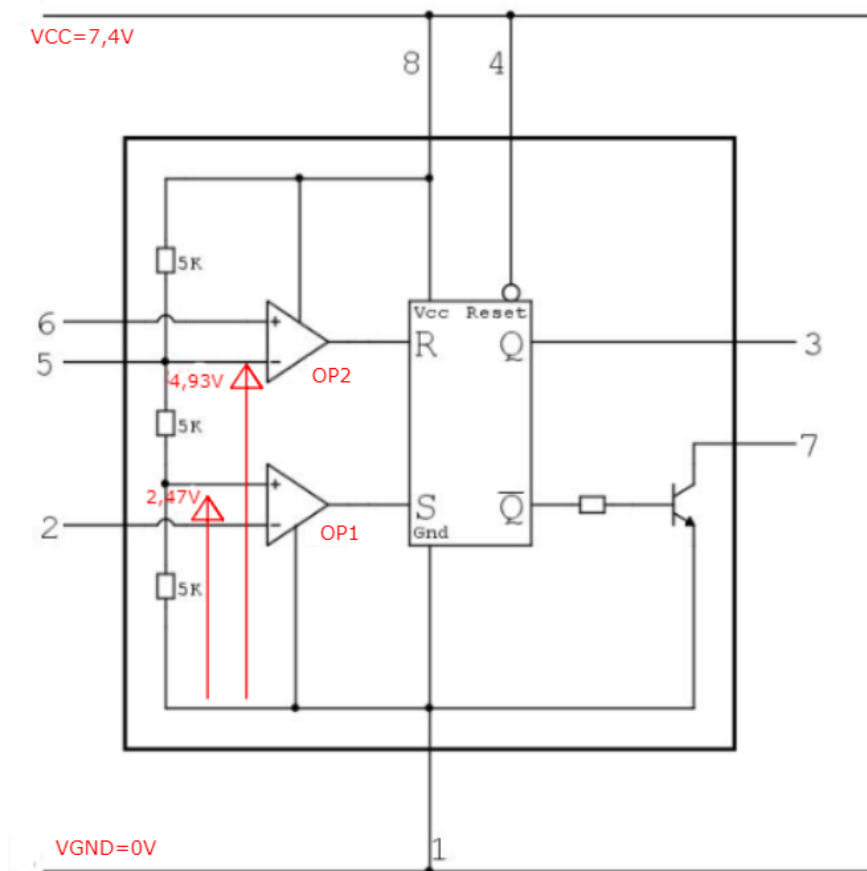
Molti integrati oltre alla normale uscita  $Q$  presentano anche un'ulteriore uscita chiamata  $\bar{Q}$  essa presenta un comportamento opposto a quello di  $Q$ , infatti quando il flip/flop ha una tensione su S verrà attivato il livello logico basso e quindi avremo in output la tensione di terra, mentre quando si attiverà l'ingresso R l'output sarà portato a un livello alto e quindi alla tensione di alimentazione.

Nel blocco flip/flop è presente anche il pin di reset che serve per comandare l'intero circuito dell'NE555, infatti tale pin avrà in ingresso una tensione che verrà comparata un con una tensione soglia ( $V_{TH}$ ) pari a 0,7V, qualora la tensione in ingresso fosse maggiore della soglia allora il circuito fornirà un uscita adeguata in base agli ingressi del flip/flop attivati, altrimenti in uscita avremo una tensione nulla. Sostanzialmente funziona come un interruttore del NE555 attivandolo e spegnendolo a seconda della tensione presente sul pin.

$V_{pin\ 4} < V_{TH}$   $\longrightarrow$  NE555 OFF

$V_{pin\ 4} > V_{TH}$   $\longrightarrow$  NE555 ON

Ora che abbiamo discusso del blocco flip/flop vediamo come si attivano i diversi ingressi e pertanto analizziamo l'intero circuito dell'NE555



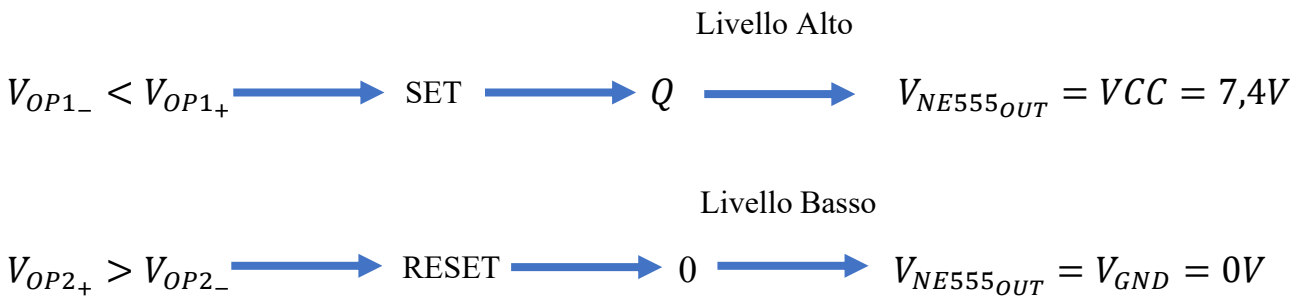
Come già detto in precedenza, a causa delle tre resistenze (R) da 5kΩ avviene una caduta di potenziale che porterà gli ingressi dei due operazionali a potenziali diversi, in particolare la tensione in ingresso + all'operazionale 1 chiamata  $V_{OP1+}$  sarà uguale a 1/3 del valore dell'alimentazione, mentre quella all'ingresso - dell'operazionale 2 ( $V_{OP2-}$ ) è pari a 2/3 di VCC.

$$V_{OP1+} = VCC \frac{R}{R + R + R} = 2,47V$$

$$V_{OP2-} = VCC \frac{R + R}{R + R + R} = 4,93V$$

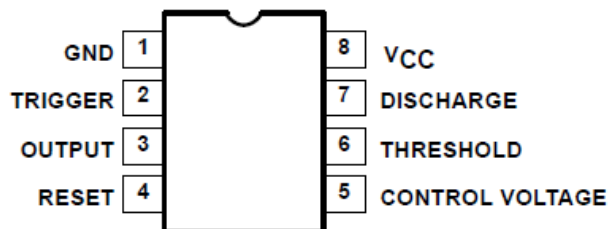
Questi due valori verranno utilizzati come valori di soglia dagli amplificatori operazionali, che in questo circuito svolgono la funzione di comparatore, qualora la tensione in ingresso - ( $V_{OP1-}$ ) dell'operazionale 1 fosse inferiore  $V_{OP1+}$  allora si attiverà l'ingresso S (set) del flip/flop producendo output Q con una tensione pari a quella di VCC, mentre se la tensione in ingresso + ( $V_{OP2+}$ )

dell'operazionale 2 fosse maggiore di  $V_{OP2-}$  allora si attiverà l'ingresso R (reset) riportando l'uscita a un livello logico basso e con una tensione di uscita pari alla tensione di terra. <sup>53</sup>



Qualora non si verificasse nessuna delle due condizioni, il flip/flop continuerebbe a erogare il medesimo output fino a quando non si ha un valore sufficiente di tensione tale da attivare uno dei due comparatori. Tutte le considerazioni fatte valgono anche se utilizzassimo l'uscita  $\bar{Q}$  con la differenza che sarà tutto invertito, ovvero quando avremo l'attivazione del set si passerà a un livello basso mentre con l'attivazione del reset si ottiene un livello alto.

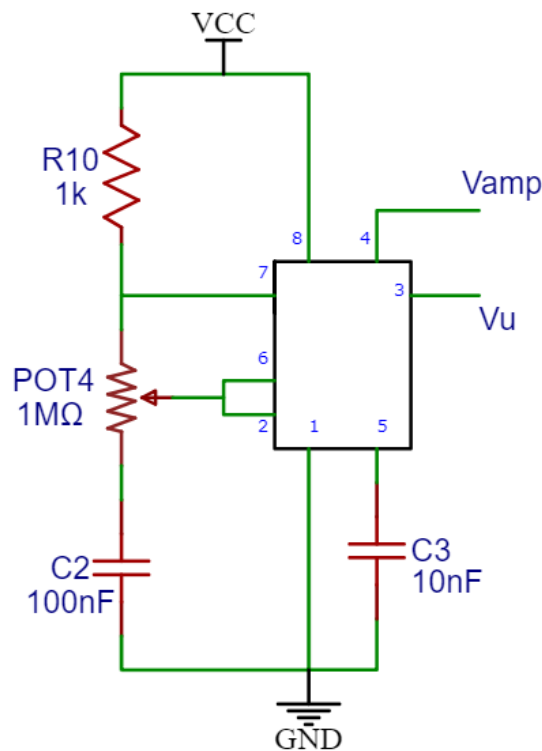
Ora che abbiamo analizzato il circuito interno e il suo funzionamento passiamo ad analizzare la struttura del circuito integrato, infatti come si può osservare in figura esso presenta 8 pin: <sup>54</sup>



- Pin 1, è il pin collegato a terra.
- Pin 2, è il pin di trigger, la tensione in ingresso a questo pin corrisponde a  $V_{OP1-}$  per tanto se risulta inferiore a  $V_{OP1+}$  consente al blocco del flip/flop di passare a un livello alto e quindi a una tensione d'uscita pari a VCC.
- Pin 3, è il pin di uscita della tensione il valore di essa dipende dal livello logico attualmente attivato.
- Pin 4, è il pin di reset, è presente una soglia di 0,7V, se viene fornita una tensione superiore a essa l'integrato continua a funzionare altrimenti se inferiore NE555 smette di funzionare, è sostanzialmente un interruttore.

- Pin 5, è il pin di controllo, la tensione in ingresso a questo pin è  $V_{OP2-}$  che è la tensione di soglia a cui viene comparata la  $V_{OP2+}$  per permettere il reset del flip/flop quindi attraverso questo pin possiamo modificare tale valore di soglia che normalmente sarebbe settato a  $2/3$  di VCC.
- Pin 6, ha la tensione in ingresso che entra nel comparatore 2 ha valore  $V_{OP2+}$  e confrontata con la tensione al pin 5 permettere di far cambiare livello logico al flip/flop.
- Pin 7, è il pin che permette di scaricare il condensatore.
- Pin 8, è il pin dove viene collegata l'alimentazione che deve avere un valore compreso fra 5 e 15V.

Discutiamo ora di come abbiamo utilizzato il circuito integrato NE555 all'interno del nostro dispositivo e in quale modalità.



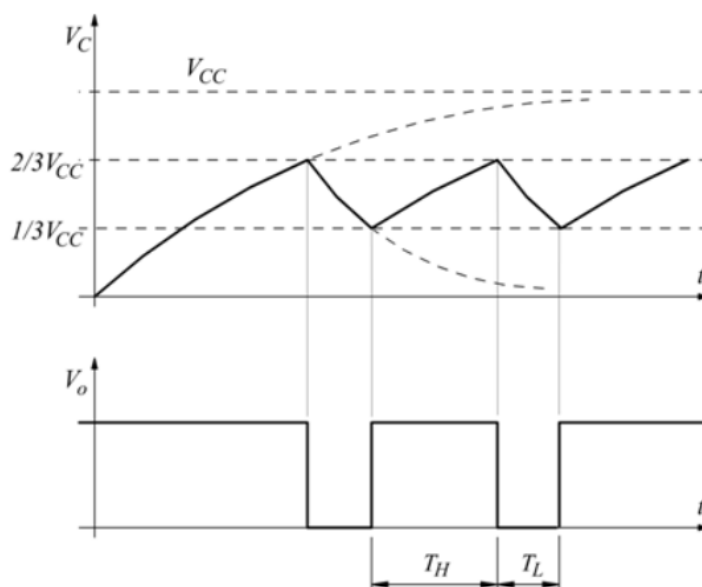
NE555 è stato utilizzato in modalità astabile, per permettere ciò bisogna collegare al circuito integrato due resistenze e un condensatore. In particolare, abbiamo utilizzato un potenziometro che ci consente una modulazione di larghezza dell'impulso ovvero un controllo PWM del motorino.

Alimentando il circuito integrato inizialmente il condensatore  $C_2$  è scarico, ciò porta il pin 2 e 6 a essere al medesimo potenziale, ovvero al potenziale di massa (0V), questo comporta l'attivazione solamente dell'amplificatore operazionale 1 poiché il potenziale sul morsetto negativo  $V_{OP1-}$  di valore 0V è inferiore al potenziale del morsetto positivo  $V_{OP1+}$  che vale  $1/3 V_{CC}$  ovvero 2,47V mentre invece il comparatore 2 ha  $V_{OP2+}$  è inferiore a  $V_{OP2-}$ .

Attivandosi il comparatore 1 si attiva il set del circuito flip/flop portando l'uscita del pin 3 a un potenziale di valore pari a  $V_{CC}$ , per tanto il transistor interno presente sul pin 7 non è attivo e non viene collegato a massa. Tale condizione permette al condensatore di iniziare a caricarsi tramite le due resistenze, questo implica che la tensione sui pin 2 e 6 inizia ad aumentare, quando raggiunge e supera il valore di  $V_{OP1+}$  il flip/flop rimane settato e l'uscita sul pin 3 rimane a  $V_{CC}$  anche se l'uscita dell'operazionale 1 non è più attiva siccome non è più rispettata la condizione, neanche la condizione per resettare il circuito è rispettata per cui rimane settato. Quando la tensione sui pin 2 e 6 raggiunge il valore di  $V_{OP2-}$  si attiva il reset del flip/flop portando al valore della massa il potenziale all'uscita dal pin 3, in questa condizione il transistor sul pin 7 si attiva collegandosi a massa portando alla scarica il condensatore attraverso la resistenza del potenziometro provocando una diminuzione del potenziale sui pin 2 e 6, fino a quando tale valore di tensione non raggiunge il valore di  $V_{OP1+}$  il circuito rimane in modalità reset, una volta raggiunto tale valore il circuito torna in modalità set riportando l'uscita del pin 3 a un valore pari a  $V_{CC}$ , si è praticamente tornati alla condizione di partenza e quindi il condensatore può nuovamente ricaricarsi. Questo ciclo di carica/scarica del condensatore, porta a un'oscillazione del valore della tensione sui pin 2 e 6 tra  $1/3 V_{CC}$  e  $2/3 V_{CC}$  implicando quindi un'oscillazione anche sull'uscita del pin 3 tra  $V_{CC}$  e  $V_{GND}$ .

Questo ciclo potenzialmente infinito di set e reset del flip/flop porta quindi a un comportamento del circuito integrato non stabile e prende appunto il nome di astabile poiché oscilla continuamente tra stato alto e stato basso.

Gli andamenti della tensione sui pin 2 e 6 e della tensione in uscita dal pin 3 sono i seguenti



Come si può notare e per tutti i motivi precedentemente descritti, il segnale di output è un'onda quadra di ampiezza  $VCC$  in cui sono presenti due tempi caratteristici: tempo di alto ( $T_H$ ) e tempo di basso ( $T_L$ ), per calcolare i valori dei due tempi bisogna fare un'analisi della fase di carica e scarica del condensatore.

- Fase di carica, durante questa fase il potenziale iniziale che cade sul condensatore 2 vale  $1/3 VCC$  mentre il valore a carica completa vale  $VCC$ , l'equazione che regola questo comportamento è la seguente:

$$V_{C2}(t) = V_f - (V_f - V_i)e^{-t/RC}$$

$$V_{C2}(t) = VCC - \left(VCC - \frac{1}{3}VCC\right)e^{-t/(R_{10}+R_{POT4})C_2}$$

Considerando che la tensione  $V_{C2}$  durante il tempo di alto vale  $2/3 VCC$  otterremo che:

$$V_{C2}(T_H) = \frac{2}{3}VCC$$

Che sostituita nell'equazione precedente porta a ottenere:

$$T_H = (R_{10} + R_{POT4})C_2 \ln 2$$

- Fase di scarica, il potenziale iniziale sul condensatore  $V_{C2}$  inizialmente vale  $2/3 VCC$  mentre a scarica completa vale 0, considerando anche che  $V_{C2}(T_L) = \frac{1}{3}VCC$  dall'andamento di  $V_{C2}$  si ricava l'equazione di  $T_L$

$$T_L = (R_{POT4})C_2 \ln 2$$

Nel dispositivo realizzato abbiamo utilizzato un condensatore poliestere ( $C_2$ ) da 100nF, un potenziometro con resistenza ( $R_{POT4}$ ) nominale di  $1M\Omega$  e una resistenza ( $R_{10}$ ) da  $1k\Omega$ , con un'alimentazione da 7,4V abbiamo ottenuto i seguenti risultati:

$$T_H = (R_{10} + R_{POT4})C_2 \ln 2 = 0,0693s$$

$$T_L = (R_{POT4})C_2 \ln 2 = 0,0693s$$

Si noti come quando la  $R_{10}$  è molto minore della  $R_{POT4}$  avremo un periodo di alto e un periodo di basso pressoché identici, ciò significa che il rapporto tra il tempo passato allo stato alto e tempo totale



$(T_H + T_L)$  sarà pari al 50%, tale rapporto prende il nome di duty cycle (DC), per tanto per ottenerlo basta utilizzare la formula:

$$DC = \frac{T_H}{T_H + T_L} = \frac{R_{10} + R_{POT4}}{R_{10} + 2R_{POT4}}$$

L'utilizzo di un potenziometro anziché di una resistenza ci permette di fare una modulazione di larghezza dell'impulso ovvero un controllo PWM, che consente di aumentare o diminuire la larghezza dell'impulso semplicemente variando la resistenza del potenziometro e quindi agirà direttamente sul duty cycle del segnale, con i nostri componenti otteniamo il seguente range di valori con valore massimo in corrispondenza di un valor nullo della resistenza del potenziometro.

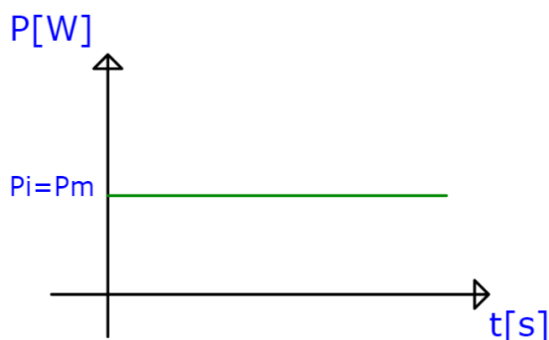
$$50\% < DC < 100\%$$

Modificare il valore del duty cycle consente di regolare la potenza che percepisce il carico (in questo caso il motorino elettrico a sbilanciamento di massa usato per generare le vibrazioni), la variazione di potenza permette al motorino di erogare vibrazioni a differenti frequenze.

In particolare, il controllo PWM permette di controllare la potenza media assorbita dal motore, alimentato da un'onda quadra con un duty cycle variabile, infatti la potenza media ( $P_m$ ) è proporzionale al DC.

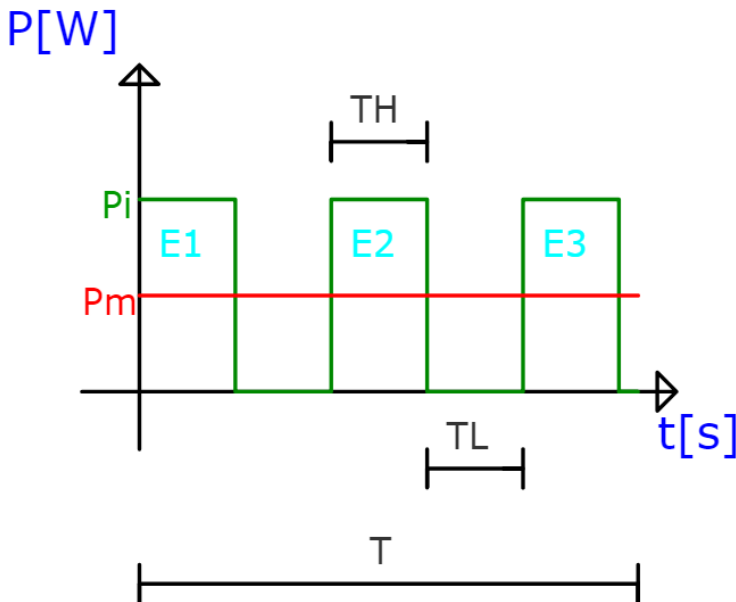
Ma come fa il duty cycle a modificare la potenza e quindi di conseguenza la tensione sul motore?

Il carico, in questo caso il motore assorbe sempre una potenza costante dalla sorgente, qualora tale potenza fosse pari alla potenza nominale del carico allora esso lavorerebbe al massimo, ad esempio se avessimo un led e l'alimentassimo costantemente alla sua potenza nominale esso si illuminerebbe alla sua maggiore intensità. In questo caso poiché la potenza assorbita è costante, la potenza media sul periodo ( $T$ ) di alimentazione coincide con la potenza istantanea, ovvero la potenza che viene fornita istante per istante al carico.



$$P_m = \frac{E}{T}$$

Come si osserva dal grafico precedente la potenza istantanea coincide con quella media, quest'ultima è calcolabile mediante il rapporto fra l'energia in quel lasso di tempo (E), ovvero l'area sottesa alla retta e il periodo di tempo T.



$$P_m = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{T}$$

$$DC = \frac{T_H}{T_H + T_L}$$

Se invece alimentassimo il carico con una potenza non più costante ma variabile nel tempo, attraverso un'onda quadra con DC=50%, la potenza media sarà sempre data dalla somma delle energie sul tempo totale T, però poiché avremo un periodo di on e un periodo di off (in questo caso metà tempo acceso e metà tempo spento) l'energia sarà esattamente la metà rispetto al caso in cui il DC sia 100% (ovvero potenza costante). Questo implica che la potenza media assorbita dal carico nel caso in cui avremo un DC pari a 50% sia esattamente la metà della potenza istantanea, per tanto le due potenze sono proporzionali tra loro con un coefficiente che è appunto il DC.

$$P_m = DC \cdot P_i$$

Tornando all'esempio di prima, tutto questo si traduce che se applicassimo una potenza istantanea con DC 50% a un led esso si attiverà illuminandosi solamente alla metà della sua intensità massima poiché la potenza media assorbita sarà il 50% della sua potenza nominale.

Per quanto riguarda la tensione sul carico non si può fare lo stesso procedimento che abbiamo fatto per la potenza e quindi considerare la tensione istantanea e media questo perché la potenza è il quadrato della tensione.

Bisogna quindi introdurre il concetto di tensione efficace ( $V_{RMS}$ ), che rappresenta una tensione continua che provocherebbe la stessa dissipazione di potenza della tensione sinusoidale, si può ottenere dalla seguente formula:

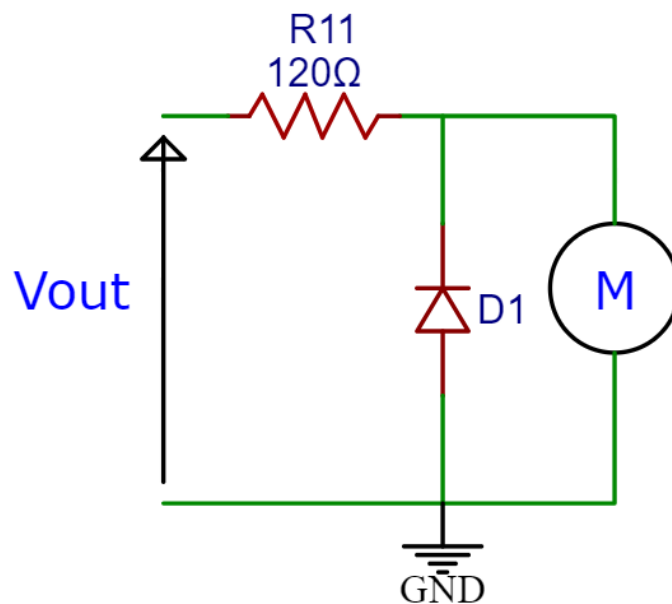
$$V_{RMS} = \sqrt{V_i^2 \cdot DC}$$

Se avessimo un carico a cui è posto in ingresso un segnale di tensione a onda quadra di 3V con un DC di 50% avremo una tensione effettiva sul carico pari a  $V_{RMS} = 2,12V$

Concludendo, si nota come utilizzando il controllo PWM si riesca a modificare il duty cycle del segnale in ingresso, inducendo sul carico una variazione di potenza assorbita e di tensione, che ha come conseguenza quella di modificare le frequenze di vibrazione del motorino.

#### 4.3.5. Blocco motorino

L'ultimo blocco riguardante lo schema elettrico del dispositivo è il seguente



In questo blocco è presente una resistenza ( $R_{11}$ ) da  $120\Omega$  che viene utilizzata per abbassare il potenziale in uscita ( $V_{out}$ ) dal NE555, per permettere al motorino di avere una tensione tale da poter erogare vibrazioni.

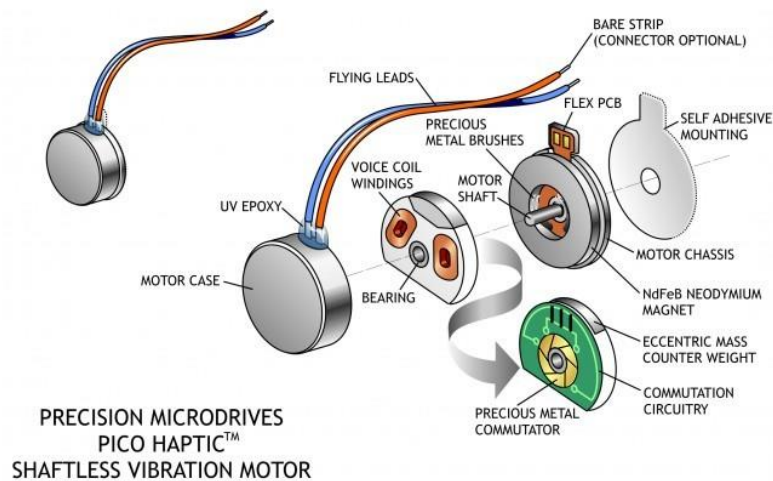
È presente inoltre un diodo raddrizzatore (1N4001) che svolge la funzione di snubber, viene quindi utilizzato per proteggere il circuito integrato, infatti quando è presente un carico induttivo come un

motore elettrico a causa della sua interruzione improvvisa, si genera un picco di tensione ai capi del dispositivo che lo controlla in questo caso l'NE555 che potrebbe danneggiarlo severamente.

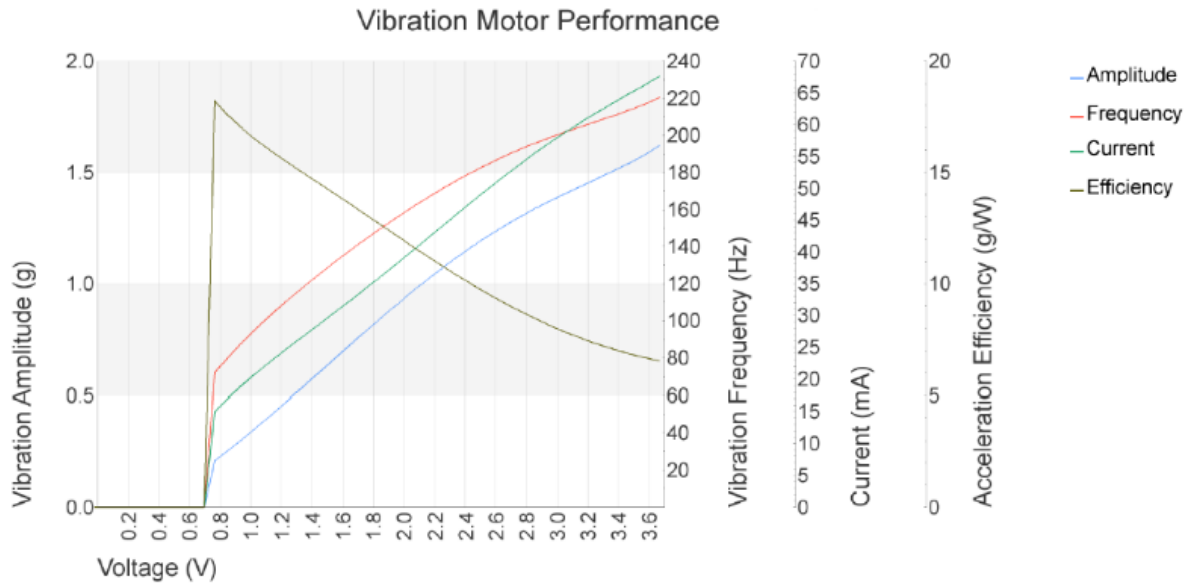
Tale tensione è causata dalle forze controelettromotrici di Lenz, per risolvere il problema si inserisce il diodo snubber in antiparallelo al carico, ciò permette alla corrente che causa il picco di tensione una volta che si disattiva il carico induttivo, di scorrere attraverso il diodo e di evitare che arrivi al controllore.

Il motore utilizzato è a massa eccentrica rotante (erm), in particolare è un modello chiamato micromotore a disco o coin (codice HC4520A), tale modello ha la particolarità di avere la massa rotante all'interno di un involucro, ciò permette al motore di essere applicato con più facilità rispetto al motore con massa esterna.

Una tipica configurazione di questo modello è la seguente:



Per una stimolazione più efficace del corpuscolo del Pacini e per permettere una sperimentazione più completa sui pazienti con neuropatologie, abbiamo constatato con la collaborazione del medico che un corretto range di stimolazione potesse essere tra i 50Hz e i 150Hz, per permettere vibrazioni meccaniche su tale range abbiamo adoperato un controllo PWM di un motorino a disco con una velocità nominale di rotazione pari a 12000 rpm, quando il motorino viene pilotato alla sua tensione nominale di 3V è in grado di emettere vibrazioni a 200Hz, ma tale valore poiché la tensione non è continua (come già visto nei blocchi precedenti l'eccitazione del motorino è un onda quadra) può essere variato, riuscendo a ottenere con la giusta calibrazione i range di frequenza voluti.

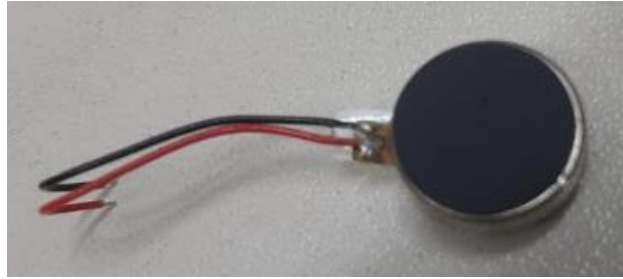


Dal precedente grafico rappresentante le performance del motore si riesce a valutare l'andamento di ampiezza, frequenza, corrente assorbita ed efficienza in funzione della tensione efficace che realmente alimenta il carico.

In particolare, si osserva come nonostante la tensione nominale sia di 3V il motorino è in grado di lavorare in un range di tensione che va da un minimo di 0,7V a un massimo di 3,6V.

Aumentando la tensione di lavoro i diversi parametri subiscono forti variazioni:

- L'ampiezza della vibrazione varia da 0 a 1,6g (dove g indica il valore dell'accelerazione di gravità pari a  $9,81 \frac{m}{s^2}$ ).
- La frequenza di vibrazione è in grado di variare tra gli 0Hz e i 220 Hz a pieno regime, range che è ottimale per i nostri scopi di stimolazione plantare.
- La corrente assorbita aumenta all'aumentare della tensione efficace raggiungendo un massimo in corrispondenza del valore di tensione massimo ed è pari a 67,5mA.
- L'efficienza è l'unico parametro dei quattro che diminuisce all'aumentare della tensione, infatti dopo aver raggiunto un picco di valore  $18 \frac{g}{W}$  in corrispondenza di 0,75V inizia a diminuire fino a un valore di  $6 \frac{g}{W}$ , questo significa che l'erogazione di vibrazioni con ampiezze e frequenze contenute richiedano un dispendio energetico inferiore rispetto ad ampiezze e frequenze maggiori, come è logico che sia.



In foto è rappresentato il motorino utilizzato, per scegliere il modello adatto ad ottenere il range di frequenze desiderato, ovvero quello tra i 50Hz e 150Hz, sono state effettuate diverse prove e misurazioni sul circuito stesso.

Da tali misurazioni sono emersi due dati importanti:

1. Il motorino connesso al circuito subisce una perdita energetica pari al 15%, ovvero un motorino con velocità di rotazione nominale pari a 12000rpm (200Hz), in realtà non gira a tale frequenza ma a una frequenza più bassa pari alla  $frequenza_{reale}$  che vale:

$$frequenza_{reale} = frequenza_{nominale} - frequenza_{nominale} \cdot 15\%$$

$$frequenza_{reale} = 170\text{Hz} (10200\text{rpm})$$

2. Il valore inferiore di frequenza a cui il motorino riesce a erogare vibrazioni meccaniche è pari al valore della  $frequenza_{reale}$  a cui va sottratto il 70%, avremo per tanto un valore minimo pari a:

$$frequenza_{min} = frequenza_{reale} - frequenza_{reale} \cdot 70\%$$

$$frequenza_{min} \cong 50\text{Hz} (3000\text{rpm})$$

Attraverso queste considerazioni abbiamo constatato che il motorino in grado di soddisfare le richieste del problema, sia il modello con una velocità nominale pari a 12000rpm ovvero 200Hz.

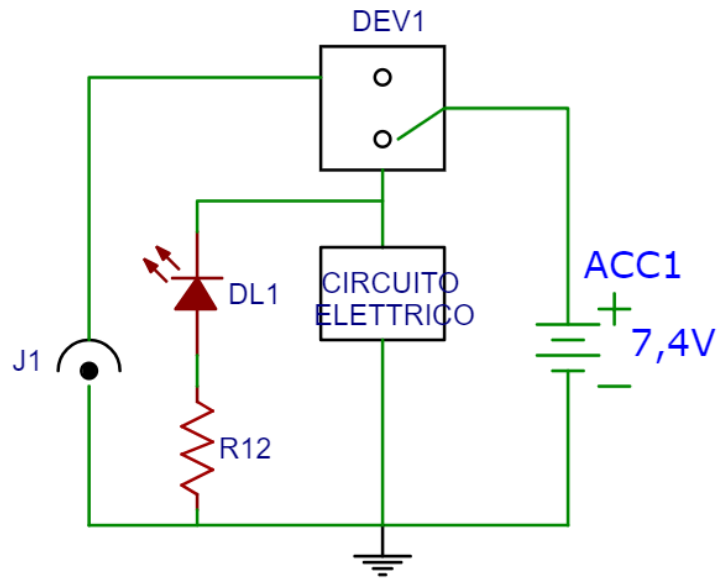
#### 4.4. ALIMENTAZIONE

Per alimentare l'intero circuito si è dovuto, a causa del range di alimentazione del NE555, utilizzare due batterie al litio posizionate in serie tra loro, infatti essendo il range di alimentazione compreso tra i 4,5V e i 16V un'unica batteria al litio avente tensione nominale di 3,7V non sarebbe stata sufficiente, pertanto l'alimentazione del circuito sarà di 7,4V.

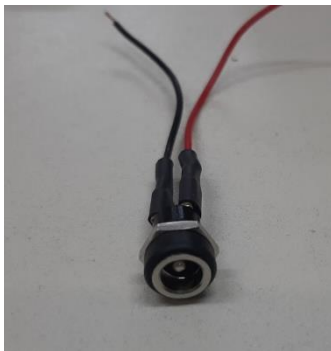


Le batterie utilizzate sono batterie ricaricabili ai polimeri di Litio (Li-Po) con una capacità di 550mAh (codice articolo: 109.016.3502), le batterie sono dei dispositivi in grado di trasformare energia chimica in energia elettrica tramite reazioni REDOX, ovvero reazioni di ossidoriduzione tra due materiali differenti che prendono il nome di catodo e anodo. In particolare, il primo cedendo elettroni si ossida mentre il secondo assorbendo elettroni si riduce, in questo tipo di batterie il catodo è realizzato tipicamente in ossido metallico mentre l'anodo in carbonio. Tra i due è presente l'elettrolita che svolge la funzione di separatore ma permettendo comunque lo scambio ionico, in queste batterie è realizzato in sali di Litio situato in un composto di polimero solido come il poliacrilonitrile.

Tali batterie permettono quindi di trasferire ioni al circuito elettrico permettendo il corretto funzionamento del circuito, osserviamo dallo schema elettrico sottostante come le batterie siano collegate al circuito, esse alimentano completamente il circuito elettrico discusso nei capitoli precedenti, inoltre parallelamente al circuito è posizionato un diodo led, visibile direttamente dall'esterno della scarpa che permetterà di capire immediatamente se la soletta sia in funzione oppure no, infatti qualora sia alimentata e operativa il led risulterà illuminato mentre nella condizione di ricarica il led presente sulla soletta sarà spento.



Per permettere la ricarica delle batterie è presente direttamente sulla soletta un jack femmina con diametro esterno di 5,5mm e diametro interno di 2,1mm, sulla basetta millefori sui cui è montato il circuito elettrico sarà presente anche un deviatore per permettere al pacco batterie di essere scollegato dal circuito qualora fosse in ricarica e viceversa, ossia se il dispositivo è in funzione le batterie devono essere collegate al circuito elettrico e al diodo led e scollegate dal jack.



Jack femmina 5,5mm



Diodo led

#### 4.5. CARICA BATTERIE

In questo capitolo analizzeremo il circuito elettrico del dispositivo utilizzato per ricaricare le batterie al Litio, una caratteristica molto importante del caricatore è sicuramente la corrente di carica, infatti tale corrente deve essere inferiore alla corrente di massima carica, nel caso delle batterie Li-Po utilizzate la massima corrente di carica corrisponde al valore di 1C, dove C indica la capacità della batteria pertanto la massima corrente di carica ( $I_{carica_{MAX}}$ ) sarà:



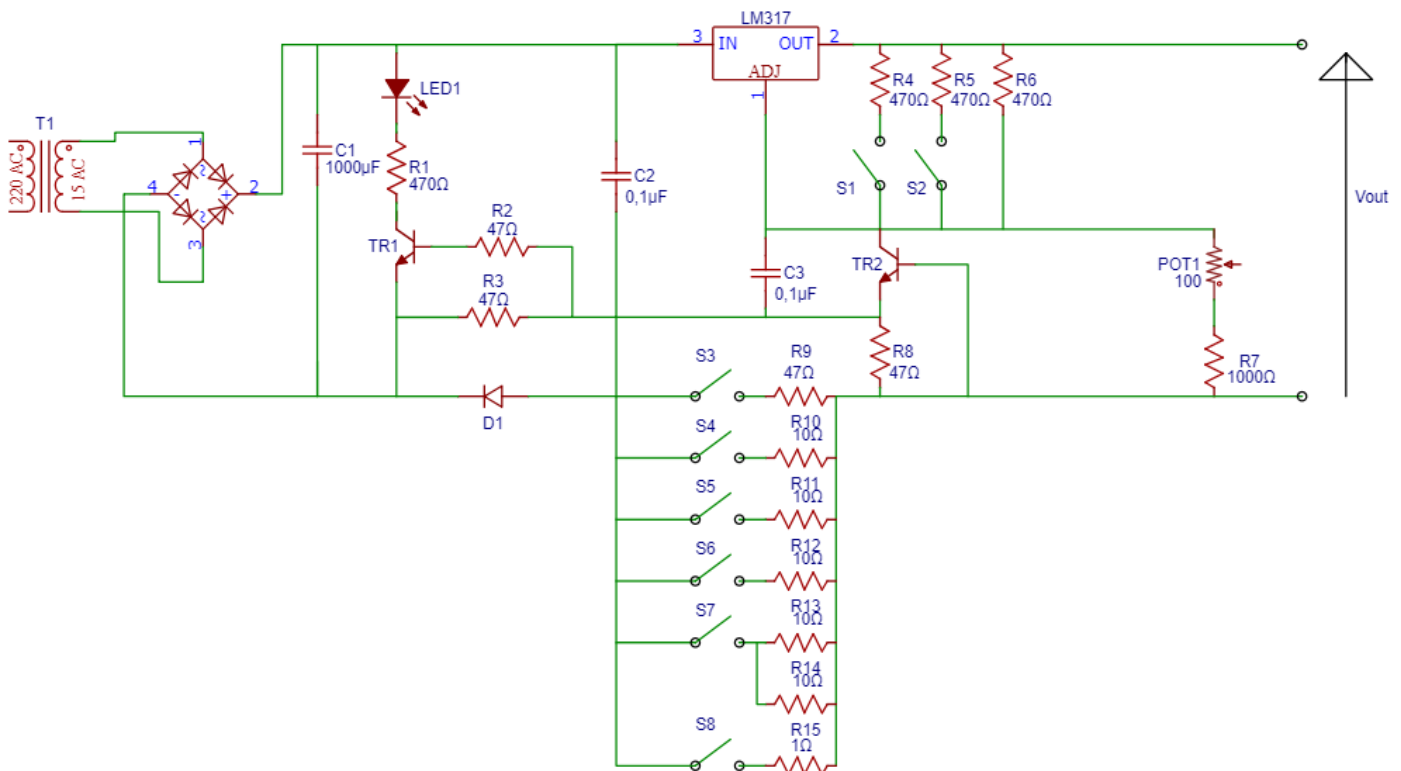
$$1C = 550mAh$$



$$I_{carica_{MAX}} = 550mA$$

Quindi utilizzando correnti di carica superiori a 550mA ci sarà un danneggiamento permanente della batteria che provocherà un calo delle prestazioni, inoltre per evitare rischio di esplosione e per consentire la corretta ricarica è necessario che anche la polarità e la tensione siano adeguati, infatti la tensione deve essere inferiore al valore di massimo ( $V_{carica_{MAX}}$ ) che per questo modello di batterie corrisponde a 4,2V.

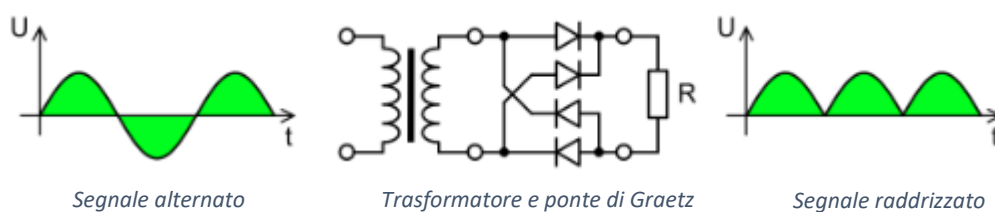
Per ricaricare le batterie al Litio sono necessari caricatori appositi poiché la tensione e la corrente in uscita dal caricatore devono essere variabili per evitare l'esplosione delle batterie, infatti fino al 70% di carica la tensione in uscita dal caricatore deve essere massima, superato questo valore la tensione inizia a diminuire fino al raggiungimento di un valore nulla quando la batteria è completamente carica.



Lo schema elettrico sopra riportato rappresenta il circuito elettrico del carica batterie, è presente un trasformatore che consente alla tensione alternata proveniente dall'alimentazione elettrica di passare da un valore di 220V in corrente alternata ai 15V in corrente alternata utilizzati nel nostro circuito, il

trasformatore permette quindi di modificare il valore di potenza elettrica presente sul primario e sul secondario attraverso un fenomeno chiamato induzione elettromagnetica.

In uscita dal trasformatore avremo un raddrizzatore, ovvero un dispositivo che consente di trasformare un segnale alternato in un segnale continuo, in questo caso abbiamo utilizzato un ponte di Graetz ovvero un ponte di diodi, tale configurazione è in grado di ottenere un segnale continuo che è la somma di una semionda positiva e di una semionda negativa ribaltata, ottenendo un treno di semionde positive che rappresentano il segnale raddrizzato.



È presente inoltre il circuito integrato LM317, regolatore di tensione che governa il funzionamento di tutto il circuito. Il carica batterie realizzato consente di avere in uscita diversi valori di tensione e corrente permettendo quindi la ricarica di più celle contemporaneamente, i valori di output vengono modificati andando a variare la condizione degli switch, nelle tabelle sottostanti sono rappresentate tutte le possibili combinazioni di interruttori che consentono di ottenere un massimo di 12,6V di tensione e 985mA di corrente.

In particolare, le tensioni in uscita che quindi regolano il numero di celle che si possono ricaricare contemporaneamente vengono modificate attraverso i primi due interruttori (S1 e S2), ottenendo un range di tensione d'uscita compreso tra i 4,2V e i 12,6V.

S1	S2	
OFF	OFF	1 Cella = 4.2v
ON	OFF	2 Cella = 8.4v
ON	ON	3 Cella = 12.6v

La corrente invece viene regolata dai restanti 6 interruttori ottenendo un range compreso tra i 10mA e i 985mA.

S3	S4	S5	S6	S7	S8	
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	10 mA
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	24 mA
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	62 mA
ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	75 mA
OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	127 mA
OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	192 mA
OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	260 mA
ON	ON	ON	ON	ON	OFF	335 mA
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	650 mA
OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	725 mA
OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	790 mA
OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	907 mA
OFF	ON	ON	ON	ON	ON	972 mA
ON	ON	ON	ON	ON	ON	985 mA

Come già discusso in precedenza le due batterie ai polimeri di litio utilizzate presentano delle correnti e delle tensioni massime di carica pari rispettivamente a:

$$I_{carica_{MAX}} = 550mA$$

$$V_{carica_{MAX}} = 4,2V$$

Per rispettare tali valori una possibile configurazione del circuito del carica batterie potrebbe essere il seguente:

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
ON	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	OFF

Tale configurazione ci permette di ottenere una tensione di 4,2V con una corrente di carica pari a 335mA ( $I_{CARICA}$ ), riuscendo così a rimanere in una condizione di sicurezza.

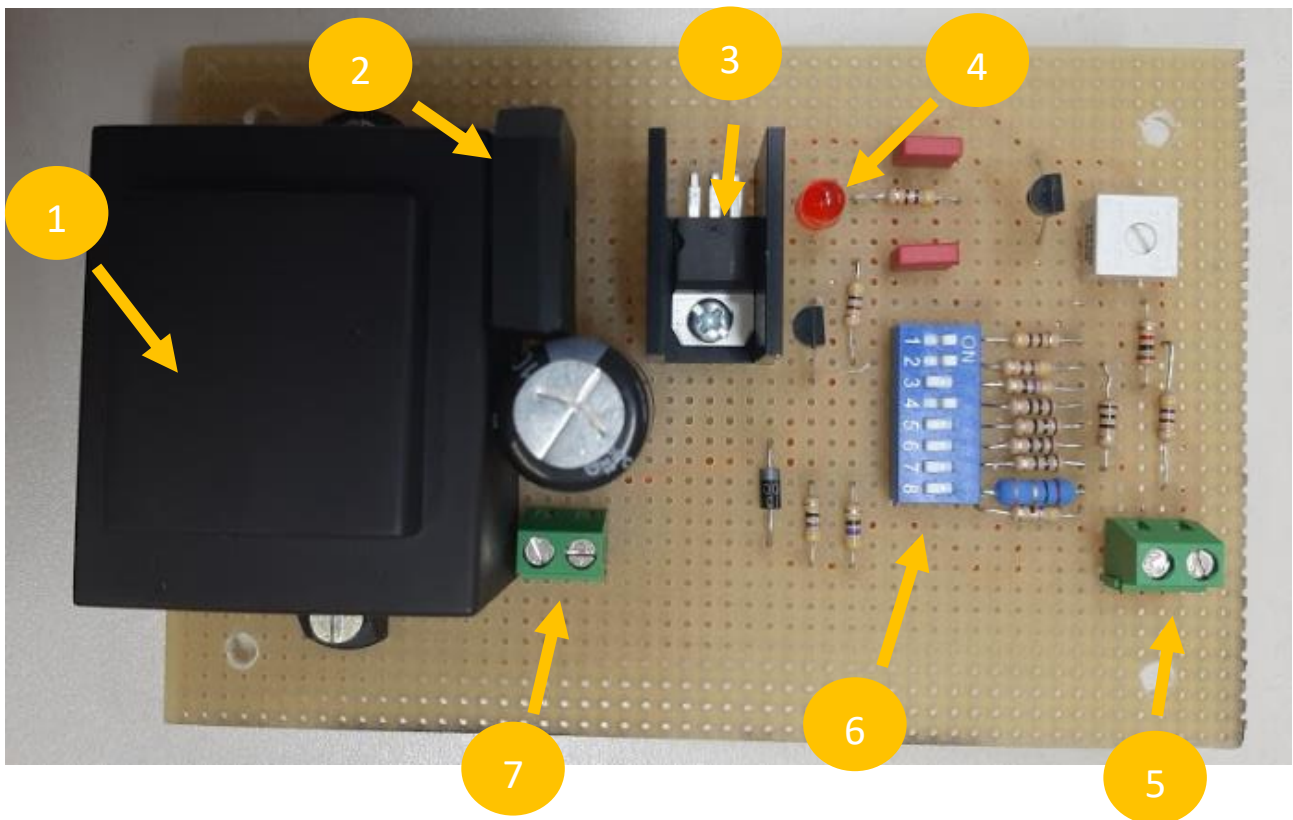
Per tanto essendo la capacità della batteria pari a 550mAh il tempo di ricarica delle due batterie da una situazione di completa scarica sarà pari a:

$$T_{CARICA} = \frac{2 \cdot C}{I_{CARICA}} = 3,28h$$

È interessante anche valutare il tempo di scarica del pacco batterie, infatti essendo collegate in serie avremo che all'uscita delle due batterie la tensione sarà la somma delle due tensioni pari cioè a 7,4V, mentre la capacità rimarrà invariata e sarà fissa a 550mAh, il circuito della soletta assorbirà una corrente pari a  $I_{SCARICA}$  dall'alimentazione, per tanto il tempo di completa scarica sarà dato da:

$$T_{SCARICA} = \frac{C}{I_{SCARICA}}$$

Una volta studiato e testato il circuito di ricarica consono al nostro dispositivo, la componentistica elettronica viene saldata su una basetta millefori, basetta che verrà poi inserita all'interno dell'apposito case, il carica batterie si collegherà alla soletta da ricaricare mediante un jack 5,5mm di diametro, la foto sottostante rappresenta lo stadio finale del carica batterie realizzato.



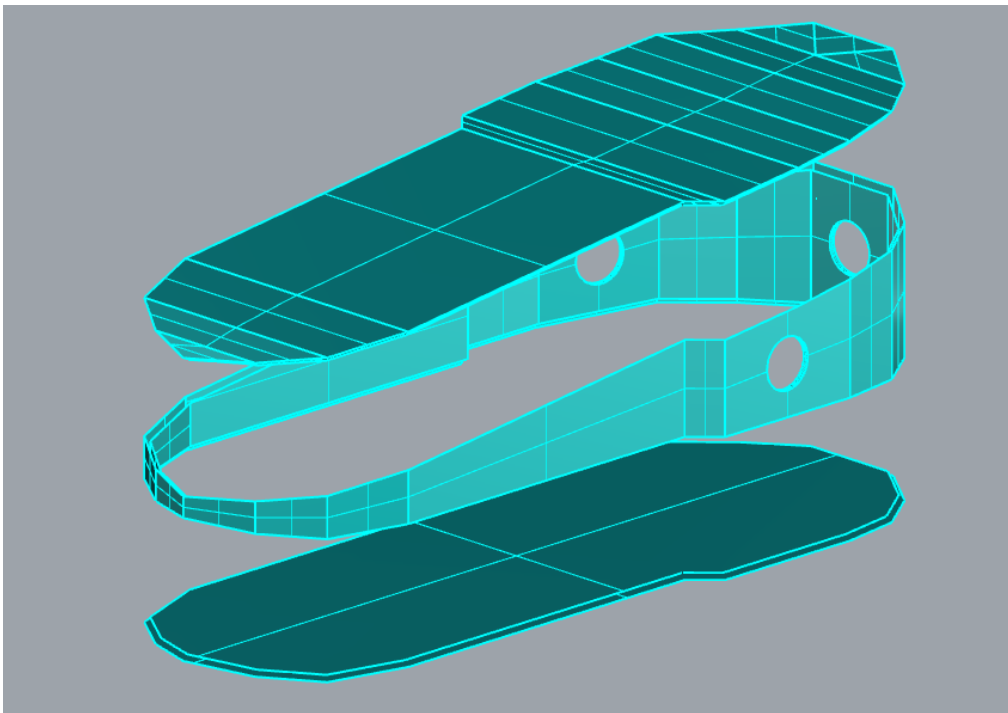
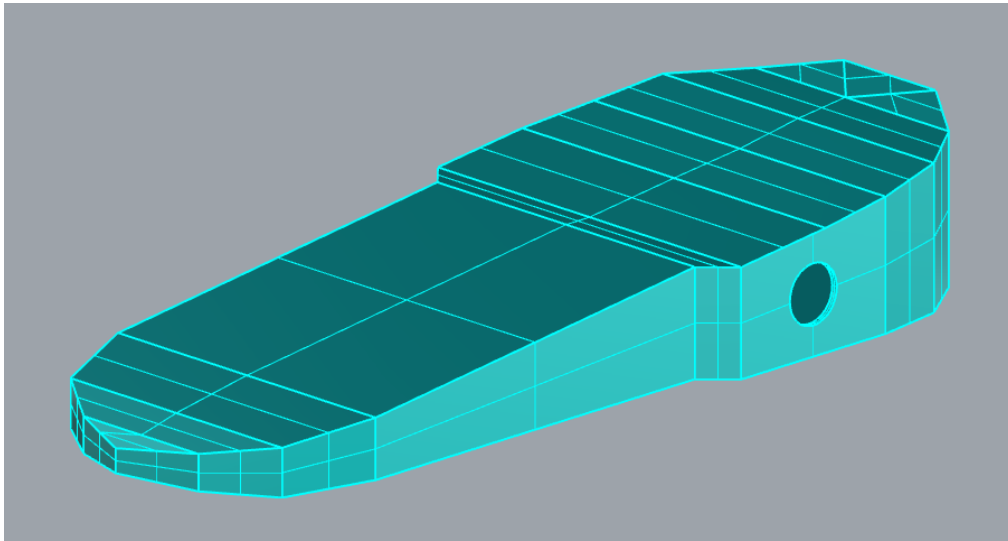
1. Trasformatore, 220Vac/15Vac
2. Ponte di diodi raddrizzatore
3. LM317 T, circuito integrato che consente la regolazione della tensione in uscita per consentire l'adeguata tensione sulle batterie a seconda di quante ne vogliamo caricare
4. Diodo Led rosso, quando il carica batterie è realmente in funzione avremo un'accensione del led per recepire immediatamente tale condizione
5. È la porta di output del carica batterie, dove quindi verrà saldato il connettore (in questo caso il jack maschio 5,5mm) che si collegherà alla soletta vibrante
6. Blocchetto in cui sono presenti tutti gli 8 switch che consentono di impostare le diverse modalità di ricarica
7. È la porta di input del caricatore ossia la porta in cui arriverà la tensione a corrente alternata dall'alimentazione elettrica, si collegherà alla rete tramite una normale presa.

#### **4.6. STRESS ANALYSIS**

Per una progettazione più completa è stata effettuata anche un'analisi a elementi finiti (FEM) della soletta, ciò ci ha aiutato a posizionare correttamente l'estensimetro, ovvero selezionare una zona con deformazioni adatte per l'attivazione del sensore e quindi del motorino, inoltre è stato valutato anche il limite di snervamento dell'intera struttura.

Il modello utilizzato per l'analisi FEM è stato realizzato con un CAD 3D chiamato Rhinoceros in particolare, è stata utilizzata la versione 5 (SR9 64-bit), con tale software si è riuscito ad ottenere un modello equivalente alla struttura metallica realizzata.

L'oggetto finale ottenuto con Rhinoceros è il seguente:

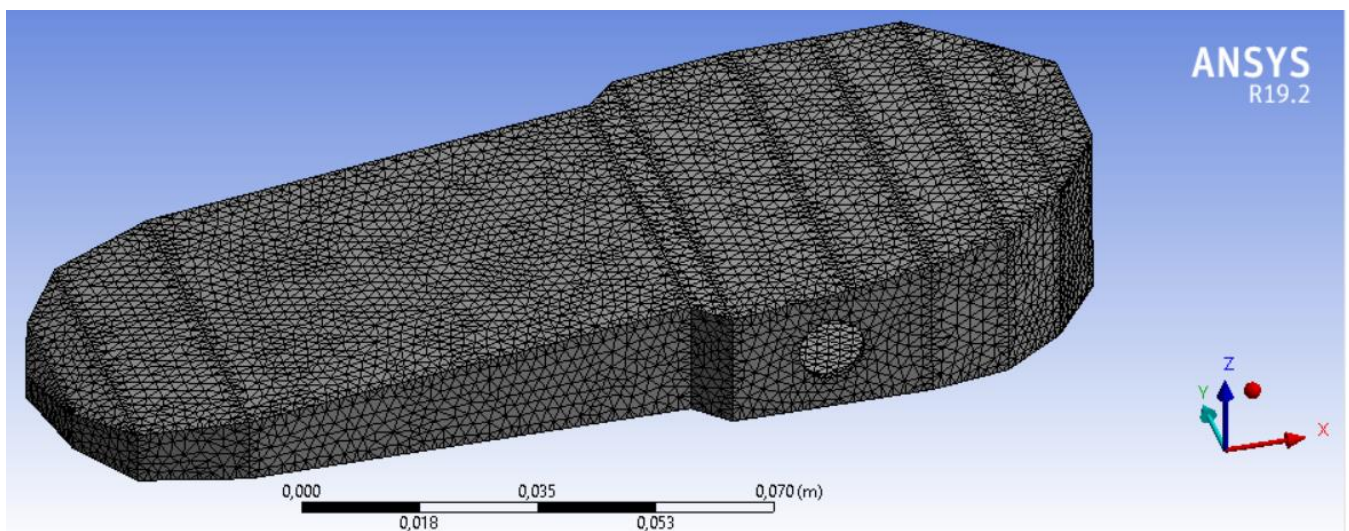


Realizzato il modello desiderato si passa al software di analisi agli elementi finiti, in questo caso Ansys Workbench (Versione 19.2), in particolare è stata effettuata un'analisi statica della struttura con lo scopo di andare a valutare gli stress massimi di Von Mises, ovvero le tensioni massime che vengono a crearsi sulla struttura e che potrebbero provocare una deformazione plastica del materiale o addirittura a una rottura, interessante è anche valutare le deformazioni poiché tali informazioni sono molto utili soprattutto per farci un'idea più accurata di dove posizionare l'estensimetro.

Fondamentale risulta quindi la scelta del materiale, per questa analisi è stato utilizzato il materiale Low Carbon Steel che presenta le seguenti caratteristiche

Property	Value	Unit
<input checked="" type="checkbox"/> Density	7850	kg m <sup>-3</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	2,1E+05	MPa
Poisson's Ratio	0,29	
Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
Shear Modulus	8,1395E+10	Pa
<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	233	MPa
<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	365	MPa

Importato il modello e assegnatogli il materiale si passa alla realizzazione della mesh, mesh che viene realizzata automaticamente dal software sfruttando elementi triangolari della dimensione di 0,001 per un totale di 48832 elementi.



Effettuata la mesh si passa ad applicare al modello le forze e i vincoli in gioco, in questa simulazione abbiamo studiato la condizione in cui il paziente sia in completo appoggio monopodalico, risulterà quindi che l'intera base della struttura sia vincolata in tutte le direzioni mentre l'unica forza puntuale causata dal peso agirà nella zona del tallone poiché molti studi hanno confermato che la distribuzione del peso fisiologica sia sensibilmente maggiore in questa zona rispetto alle altre zone del piede, infatti sul retropiede e quindi sul tallone avremo una distribuzione del peso pari al 60% del totale.

I seguenti risultati dell'analisi sono stati prodotti per due condizioni limite di massa del paziente:

- Paziente di massa 100Kg ( $M_1$ ) in appoggio monopodalico, risulterà che la forza in modulo agente sul singolo piede causata dalla forza di gravità (g) sarà pari a

$$F_{PIEDE_1} = M_1 g \cong 1000N$$

Con una distribuzione del peso pari al 60% avremo che la forza agente sul tallone sarà

$$F_{TALLONE_1} \cong 600N$$

- Paziente di massa 50Kg ( $M_2$ ) in appoggio monopodalico, la forza in modulo agente sul piede e in particolare sul tallone saranno quindi pari a

$$F_{PIEDE_2} = M_2 g \cong 500N$$

$$F_{TALLONE_2} = 300N$$

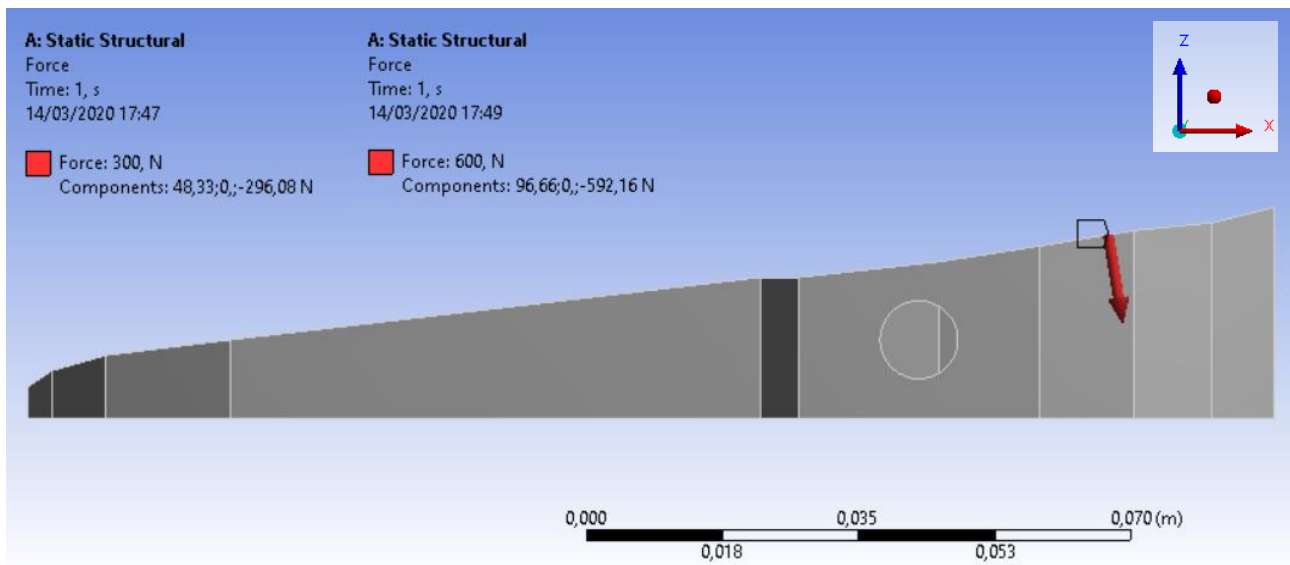
Le forze applicate non saranno perfettamente perpendicolari al terreno ma avranno componenti sull'asse x e z, in particolare avremo che i valori delle due forze saranno come visibile dalle foto effettuate pari a:

$$F_{TALLONE_{1X}} = 96,66N$$

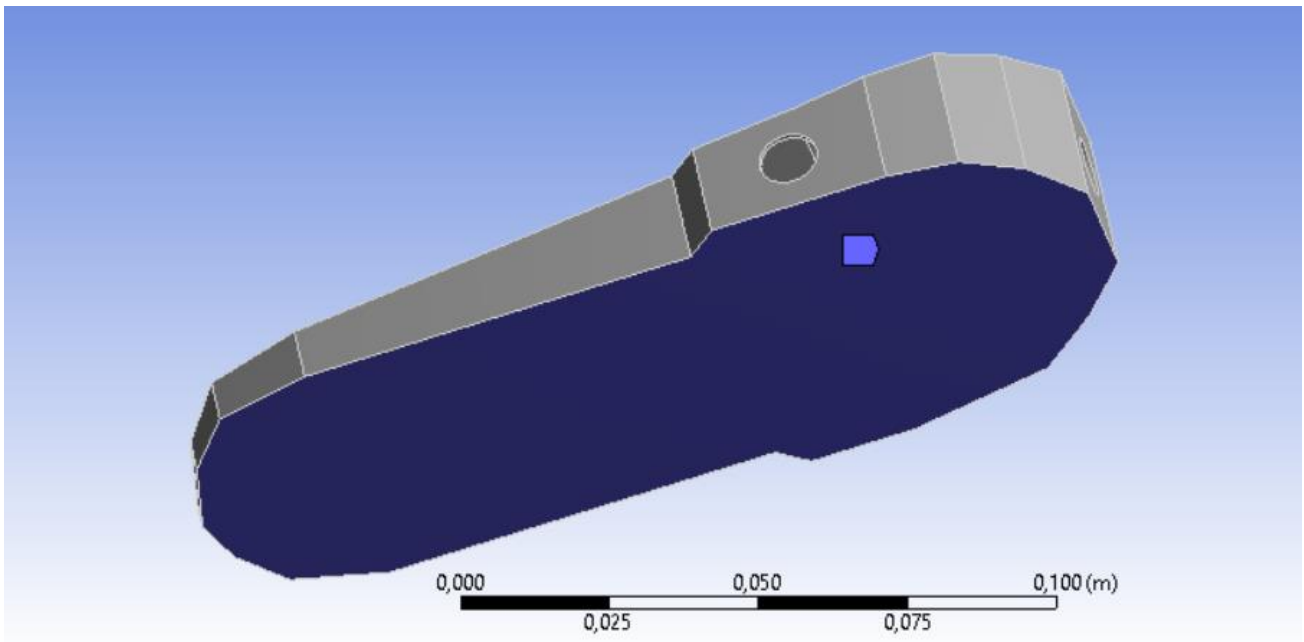
$$F_{TALLONE_{1Z}} = -592,16N$$

$$F_{TALLONE_{2X}} = 48,33N$$

$$F_{TALLONE_{2Z}} = -296,08N$$

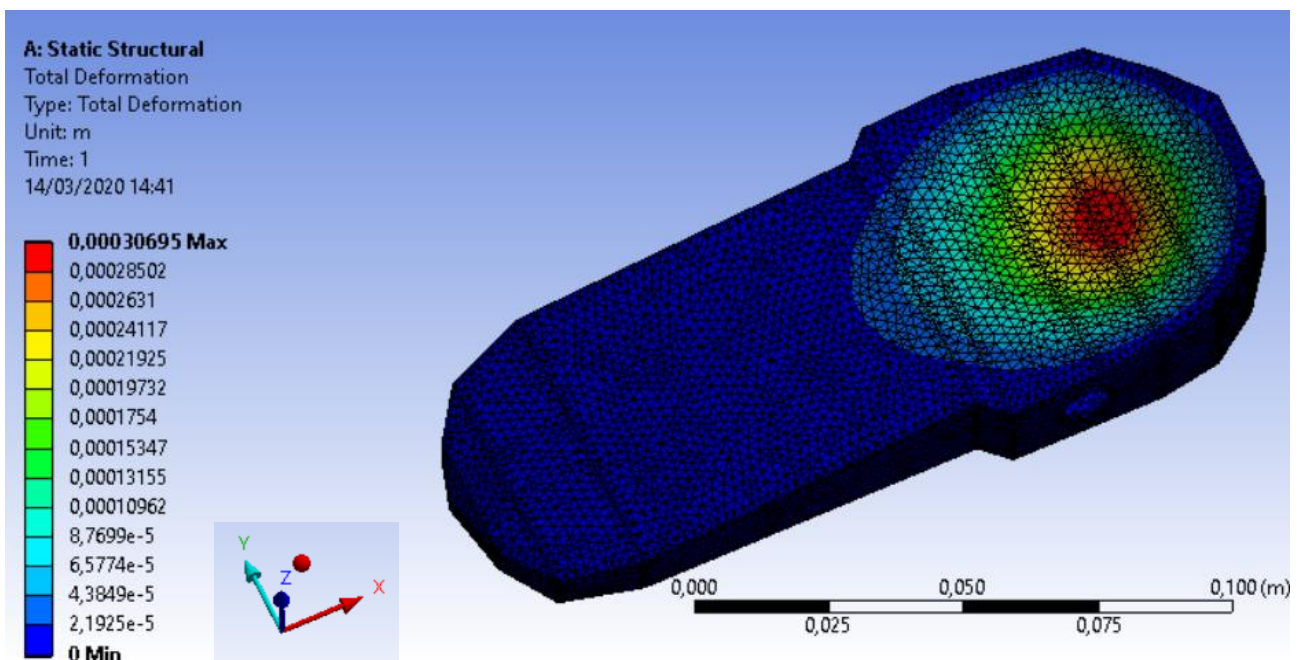






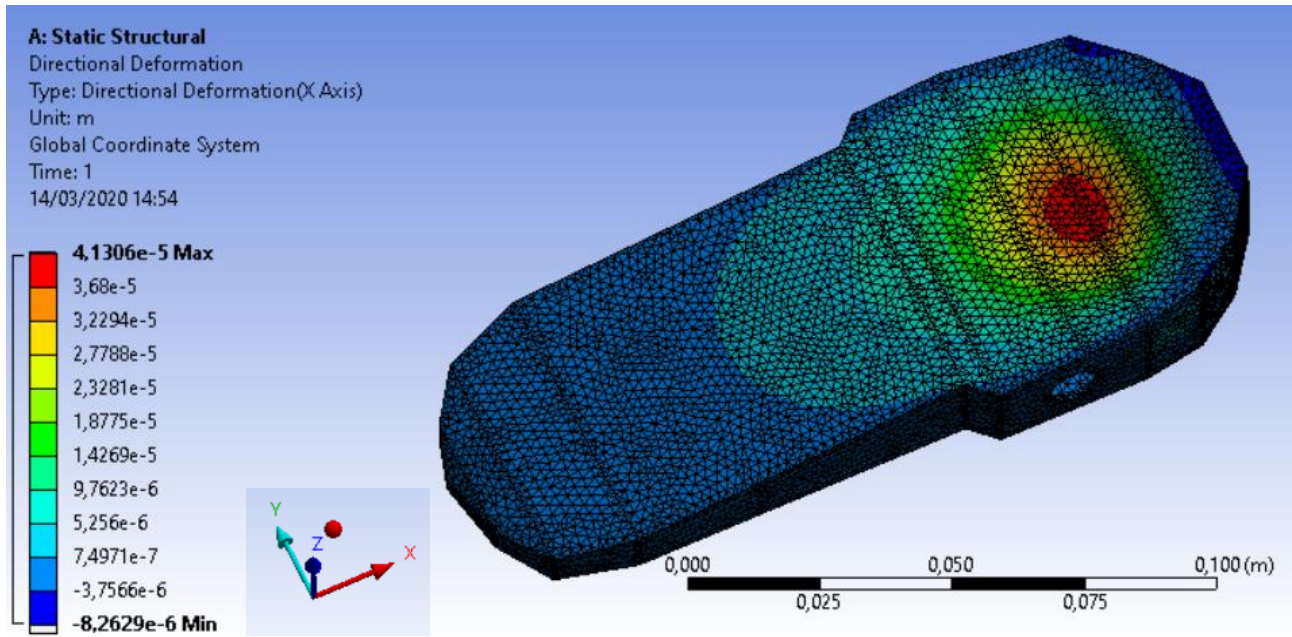
I risultati ottenuti nelle due condizioni di sollecitazione saranno quindi i seguen

1. Soggetto di massa 100Kg
  - Deformazione totale



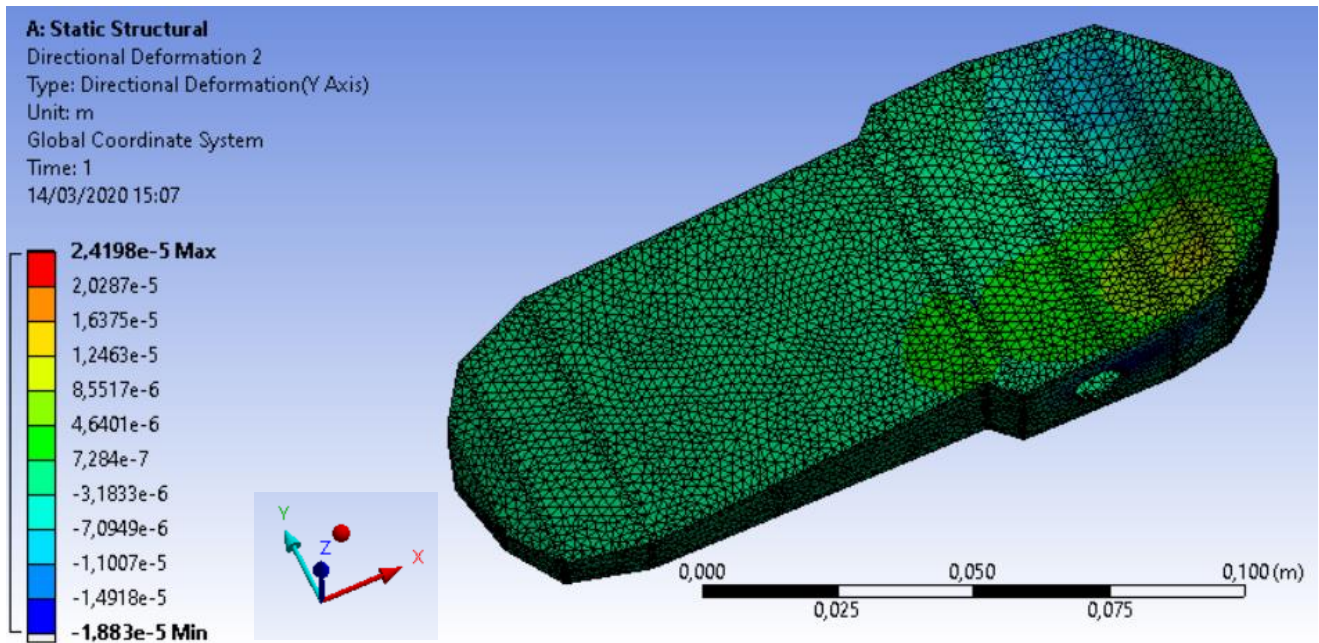
La deformazione totale ha un massimo come intuibile nella zona di applicazione del carico, con un valore pari a  $\epsilon_{totale_1} = 306,95\mu m$ .

- Deformazione lungo asse x



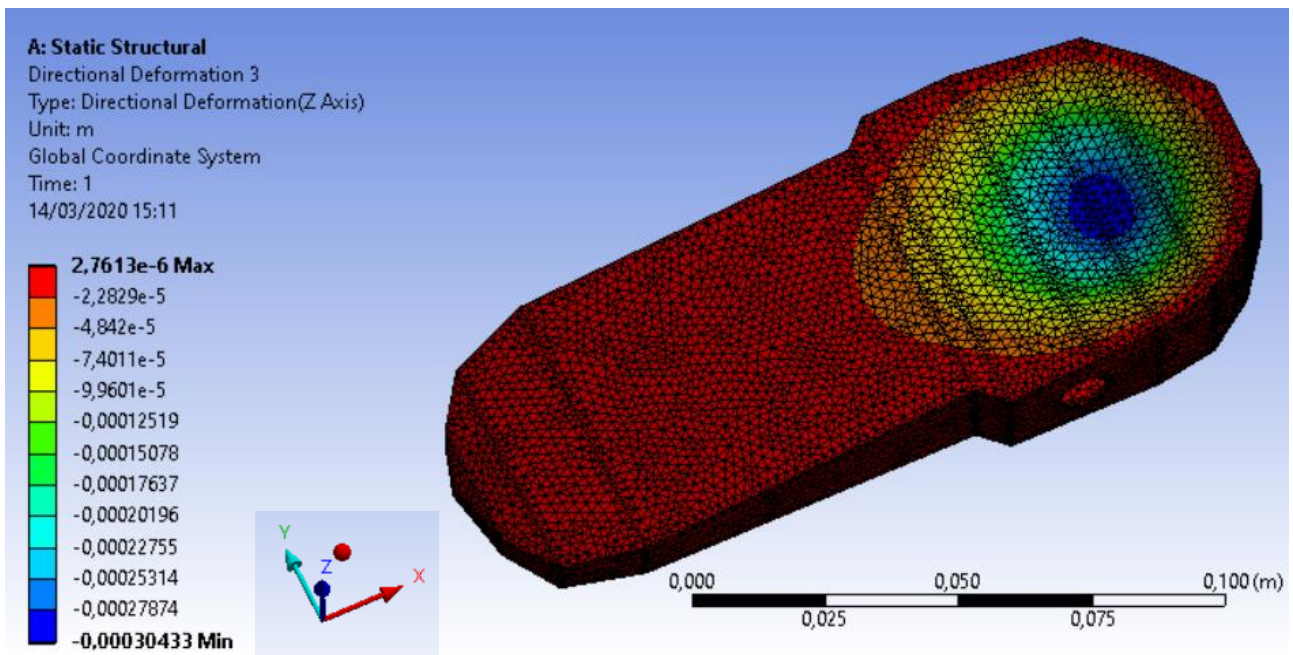
La deformazione massima lungo x è  $\varepsilon_{x_1} = 41,30\mu m$

- Deformazione lungo asse y



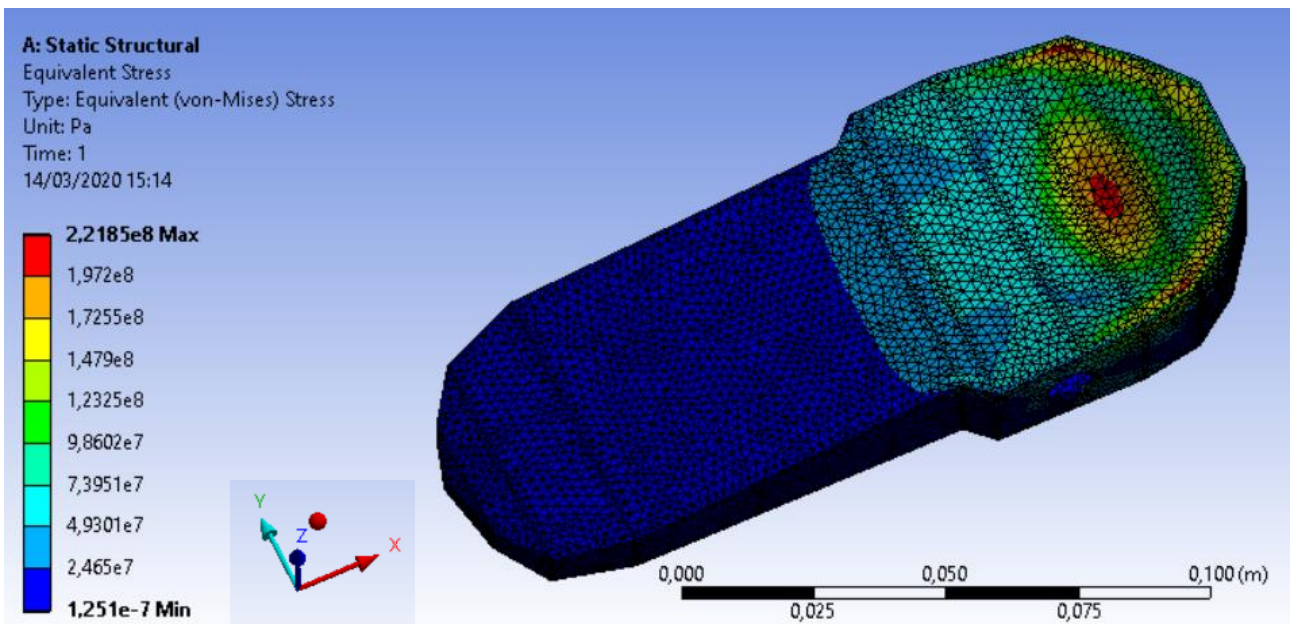
La deformazione massima lungo y è  $\varepsilon_{y_1} = 24,19\mu m$

- Deformazione lungo asse z



La deformazione massima in modulo lungo z è  $\varepsilon_{z_1} = 304,33\mu m$ , com'era prevedibile la maggior deformazione sarà sull'asse in cui è presente la componente maggiore della forza.

- Tensioni equivalenti di Von Mises



Le tensioni equivalenti di Von Mises sono interessanti da analizzare, poiché ci forniscono un criterio di resistenza che ci permette di valutare le condizioni limite di snervamento di materiali duttili e isotropi.

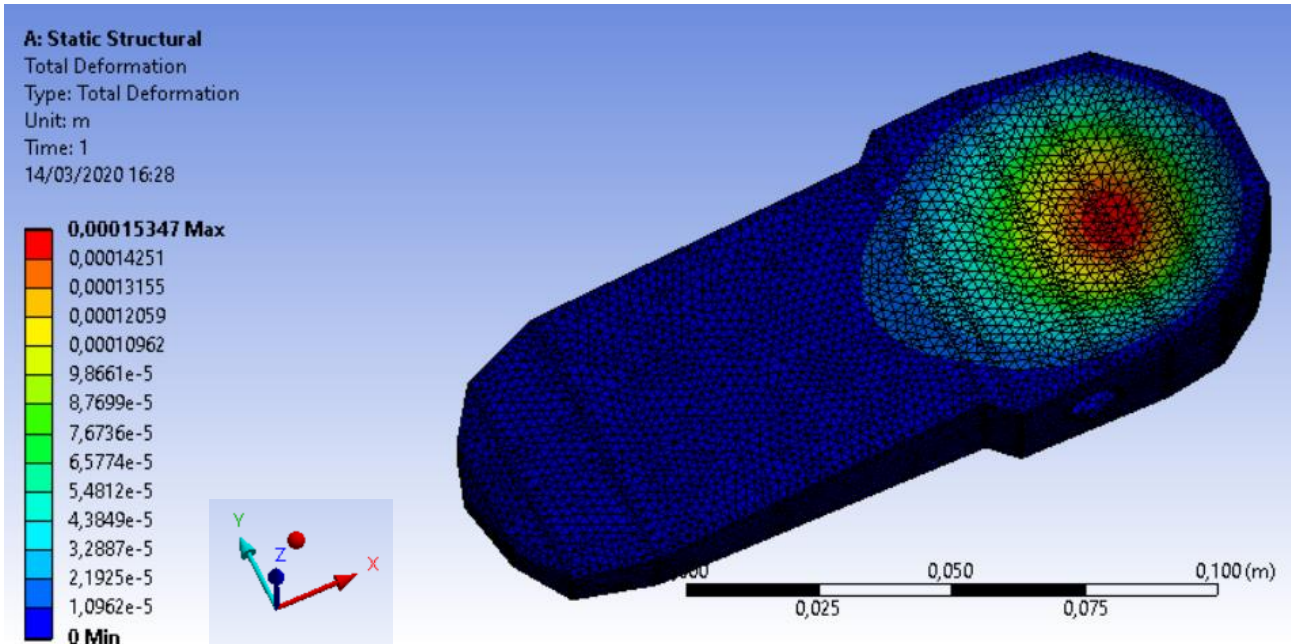
Infatti, confrontando il valore massimo di tensione equivalente ( $\sigma_{MAX} = 221,85MPa$ ) che logicamente è in corrispondenza della zona in cui è applicata la tensione, con il valore di snervamento del materiale ( $\sigma_{SNERVAMENTO} = 233MPa$ ), riusciremo a capire se la struttura è in grado di reggere la forza applicata, in questo caso avremo che:

$$\sigma_{MAX} < \sigma_{SNERVAMENTO}$$

Essendo che la tensione massima di Von Mises è inferiore alla tensione limite di snervamento del materiale la struttura sarà in grado di reggere il peso di un paziente di massa 100Kg, avendo valori inferiori al limite di snervamento si rimane nel campo elastico, campo in cui tutte le deformazioni saranno deformazione elastiche e pertanto completamente recuperabili dal materiale.

## 2. Soggetto di massa 50Kg

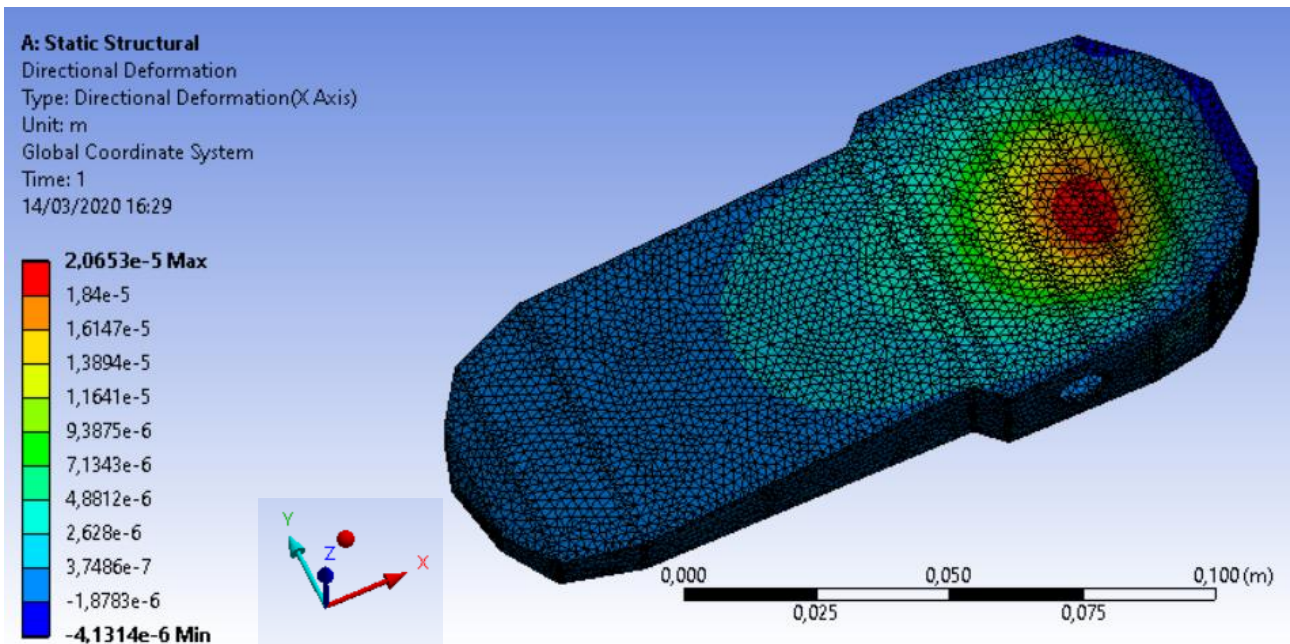
- Deformazione totale



La deformazione totale in questo caso sarà pari :

$$\varepsilon_{totale_2} = 153,47\mu m$$

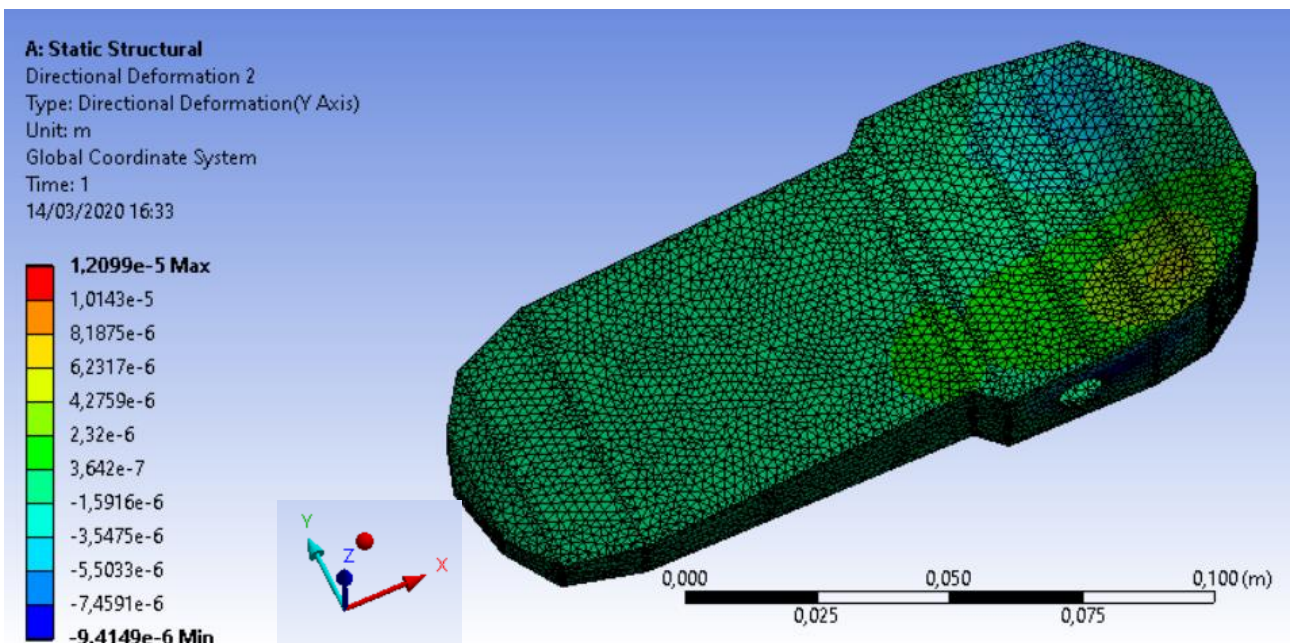
- Deformazione lungo asse x



La deformazione massima lungo l'asse x sarà pari a:

$$\varepsilon_{x_2} = 20,65 \mu m$$

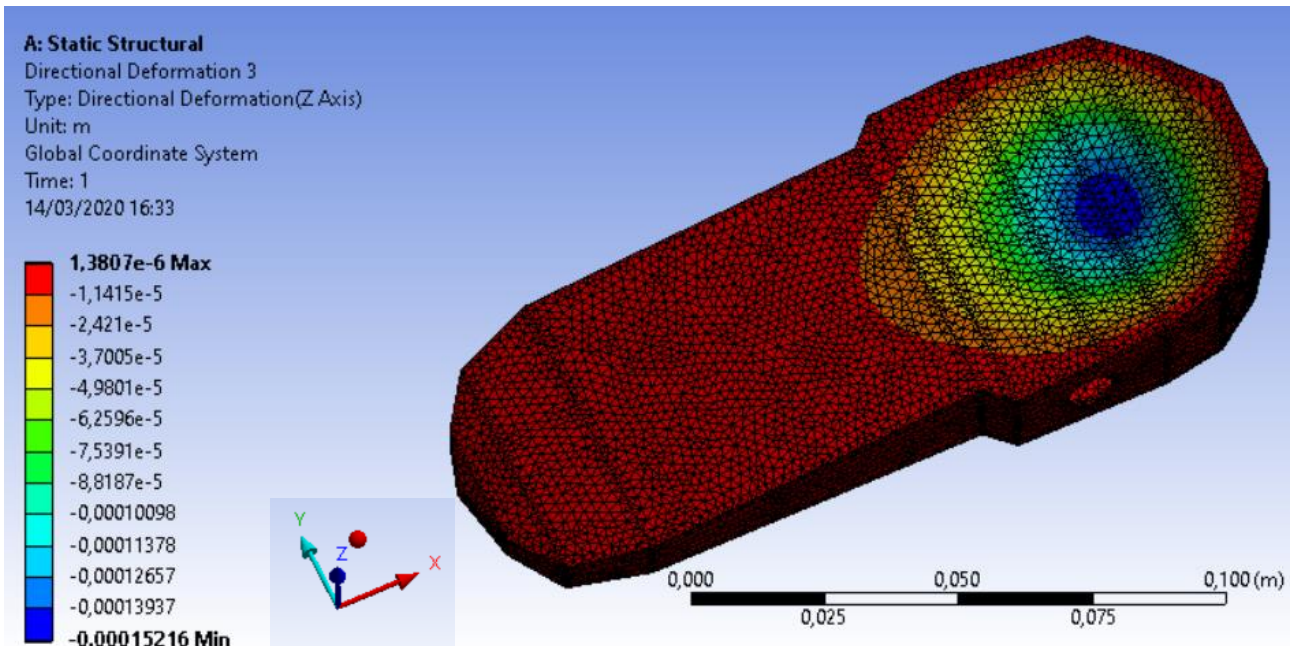
- Deformazione lungo asse y



La deformazione massima lungo l'asse y sarà pari a:

$$\varepsilon_{y_2} = 12,09 \mu m$$

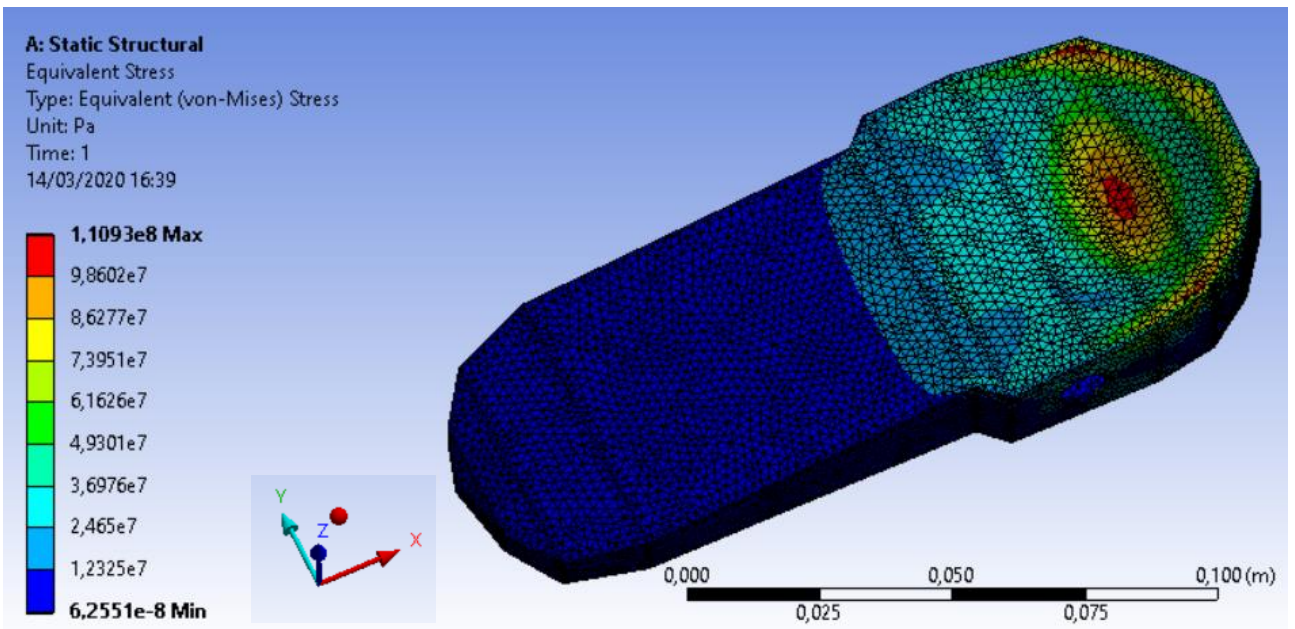
- Deformazione lungo asse z



La deformazione massima lungo l'asse z sarà pari a:

$$\varepsilon_{z_2} = 152,16\mu m$$

- Tensioni equivalenti di Von Mises



La tensione di Von Mises massima sarà pari a 110,93Mpa, risulta quindi molto inferiore rispetto al limite di snervamento è per tanto siamo in una condizione di sicurezza.

L'analisi agli elementi finiti ci ha permesso quindi di analizzare la resistenza della struttura sollecitata dalla forza peso e di valutarne le deformazioni ed è proprio dallo studio delle deformazioni che abbiamo studiato la posizione più adeguata per posizionare l'estensimetro.

Per valutare il range corretto delle deformazioni in grado sbilanciare l'estensimetro e tutto il ponte di Wheatstone, per permettere l'attivazione del motorino e quindi per la generazione di vibrazioni meccaniche abbiamo dovuto prima fare delle considerazioni sull'estensimetro.

Abbiamo effettuato una serie di misure sul circuito durante il funzionamento per valutare il range di deformazione che il nostro estensimetro è in grado di percepire, le misure sono state effettuate partendo da una condizione iniziale ben precisa, quella di ponte di Wheatstone bilanciato (per bilanciarlo si utilizza il potenziometro1).

Bilanciato il ponte, si va a deformare l'estensimetro fino a quando non si attiva il motorino, in questa condizione si va a misurare la resistenza dell'estensimetro stesso e la tensione in uscita dal ponte, con questi dati siamo in grado di ricavare il valore di deformazione che l'estensimetro deve subire per attivare l'intero circuito. Tali misure sono state effettuate in condizione di massimo guadagno dell'amplificatore e in caso di minimo guadagno dell'amplificatore, i risultati ottenuti sono i seguenti:

Guadagno	$R_{ESTENSIMETRO}$	$V_{OUT}$	$V_{ING}$	$\frac{\Delta R}{R}$	$\frac{\Delta L}{L}$
$G_{MAX} = 1000$	$R_i = 120\Omega$	1mV	7,4V	0,00066	321,95 $\mu$ strain
	$R_f = 120,08\Omega$				
$G_{MIN} = 10$	$R_i = 120\Omega$	76,98mV	7,4V	0,042833	20894 $\mu$ strain
	$R_f = 125,15\Omega$				

Ricavata la deformazione assiale  $\epsilon_a$  ( $\frac{\Delta L}{L}$ ) siamo in grado di stimare l'allungamento dell'estensimetro  $\Delta L$  e analizzando la distribuzione delle tensioni e delle deformazioni ottenute con l'analisi FEM è stata individuata la zona migliore per posizionare l'estensimetro, i valori di allungamento ottenuti considerando una lunghezza dell'estensimetro L pari a 2,5mm sono i seguenti.

$$\frac{\Delta L}{L} = 321,95\mu\text{strain} \quad \xrightarrow{G=1000} \quad \Delta L = 0,8\mu\text{m}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = 20894 \mu\text{strain}$$

G=10



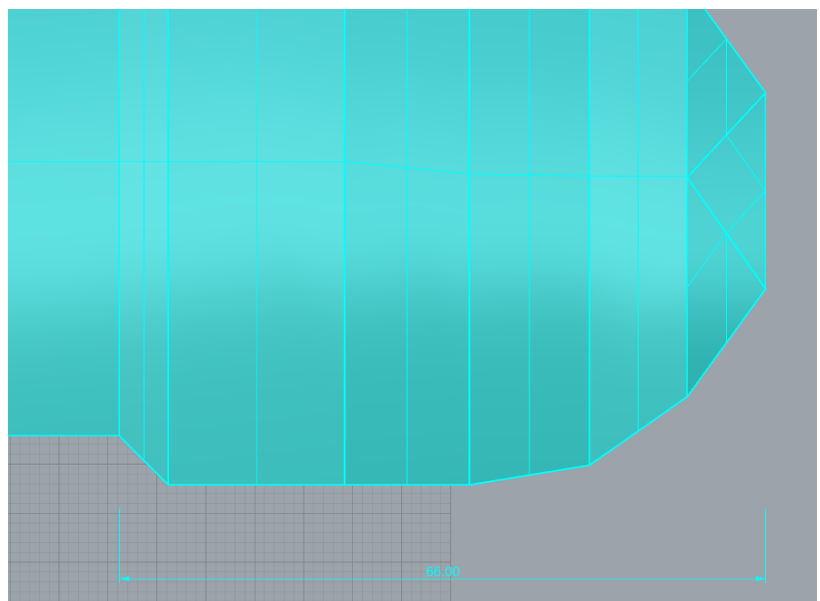
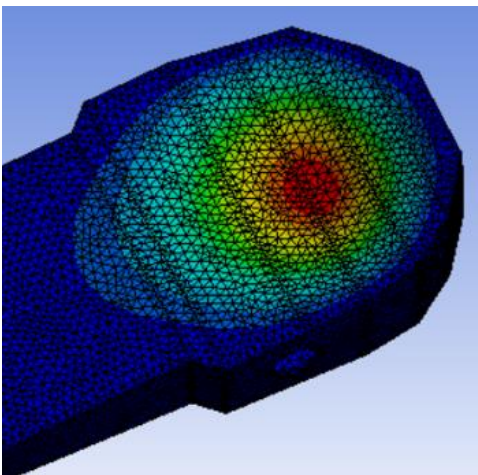
$$\Delta L = 52 \mu\text{m}$$

Questi risultati rappresentano l'allungamento minimo che l'estensimetro deve fare per sbilanciare il ponte e di conseguenza attivare il motorino, com'era pronosticabile un guadagno maggiore dell'amplificatore poiché consente di intensificare segnali più bassi è molto più sensibile e permette l'attivazione del motorino con  $\Delta L$  più bassi a differenza del caso a minimo guadagno.

La deformazione dell'estensimetro avverrà sul piano XZ per tanto le distribuzioni delle deformazioni da prendere in considerazione sono quelle su tale piano, la deformazione totale su questo piano sarà pari a:

$$\varepsilon_{XZ} = \sqrt{\varepsilon_X^2 + \varepsilon_Z^2}$$

Da queste considerazioni abbiamo concluso che la zona adatta per posizionare l'estensimetro potesse essere quella con una deformazione  $\varepsilon_{XZ}$  compresa tra i  $10 \mu\text{m}$  e i  $20 \mu\text{m}$  e più precisamente nella zona di color azzurro della deformazione, a una distanza di  $66 \text{mm}$  dal tallone.





## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. *Sistema Nervoso*. <https://www.humanitas.it/enciclopedia/anatomia/sistema-nervoso> (Ultima connessione 19/03/2020)
2. *Sistema Nervoso*. [https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_nervoso](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_nervoso) (Ultima connessione 19/03/2020)
3. *Sistema Nervoso Centrale*. [https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_nervoso\\_centrale](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_nervoso_centrale) (Ultima connessione 19/03/2020)
4. *Sistema Nervoso Centrale*. <https://www.humanitas.it/enciclopedia/anatomia/sistema-nervoso/sistema-nervoso-centrale> (Ultima connessione 19/03/2020)
5. *Sistema Nervoso Centrale*. <https://www.my-personaltrainer.it/fisiologia/sistema-nervoso-centrale.html> (Ultima connessione 19/03/2020)
6. *Sistema Nervoso Centrale*. <https://www.humanitas.it/enciclopedia/anatomia/sistema-nervoso/sistema-nervoso-centrale/cervello> (Ultima connessione 19/03/2020)
7. *Midollo Spinale*. [https://it.wikipedia.org/wiki/Midollo\\_spinale](https://it.wikipedia.org/wiki/Midollo_spinale) (Ultima connessione 19/03/2020)
8. *Midollo Spinale*. <https://www.humanitas.it/enciclopedia/anatomia/sistema-nervoso/sistema-nervoso-centrale/midollo-spinale> (Ultima connessione 19/03/2020)
9. *Sistema Nervoso*. <https://www.my-personaltrainer.it/fisiologia/sistema-nervoso.html> (Ultima connessione 19/03/2020)
10. *Sistema Nervoso Periferico*. <https://www.gavazzeni.it/enciclopedia-medica/anatomia-corpo-umano/sistema-nervoso-periferico/> (Ultima connessione 19/03/2020)
11. *Sistema Nervoso Periferico*. [https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_nervoso\\_periferico](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_nervoso_periferico) (Ultima connessione 19/03/2020)
12. *Sistema Nervoso Somatico*. <https://www.humanitas.it/enciclopedia/anatomia/sistema-nervoso/sistema-nervoso-periferico/sistema-nervoso-somatico> (Ultima connessione 19/03/2020)
13. *Sistema Nervoso Autonomo*. <https://www.humanitas.it/enciclopedia/anatomia/sistema-nervoso/sistema-nervoso-periferico/sistema-nervoso-autonomo> (Ultima connessione 19/03/2020)
14. *Nervo*. <https://it.wikipedia.org/wiki/Nervo> (Ultima connessione 19/03/2020)
15. *Nervi*. <https://www.my-personaltrainer.it/fisiologia/nervi.html> (Ultima connessione 19/03/2020)
16. *Neurone*. [http://www.treccani.it/enciclopedia/neurone\\_res-f6daa336-9b53-11e1-9b2f-d5ce3506d72e\\_%28Dizionario-di-Medicina%29/](http://www.treccani.it/enciclopedia/neurone_res-f6daa336-9b53-11e1-9b2f-d5ce3506d72e_%28Dizionario-di-Medicina%29/) (Ultima connessione 19/03/2020)
17. *Neurone*. <https://it.wikipedia.org/wiki/Neurone> (Ultima connessione 19/03/2020)

18. *Intorpidimento*. <https://www.msmanuals.com/it-it/professionale/malattie-neurologiche/sintomatologia-dei-disturbi-neurologici/intorpidimento> (Ultima connessione 19/03/2020)
19. *Intorpidimento*. <https://www.msmanuals.com/it-it/casa/disturbi-di-cervello,-midollo-spinale-e-nervi/sintomi-e-diagnosi-dei-disturbi-cerebrali,-del-midollo-spinale-e-dei-nervi/intorpidimento> (Ultima connessione 19/03/2020)
20. Andromeda S.R.L. *Neurofisiologia della percezione vibratoria: i recettori del corpo umano*. In: 2. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
21. Enrico Granieri, *Disordini di sensibilità*, materiale didattico
22. Enrico Granieri, *Le atassie*, materiale didattico
23. Andromeda S.R.L. *Cosa è la vibrazione*. In: 1. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
24. A.R. Ganji, A.J. Wheeler, *Engineering Experimentation*, 3 ed., United States, Pearson College Div, 28 dicembre 2009
25. Luigi Carlo Chiarenza, *La valutazione del rischio Vibrazione e i suoi aspetti applicativi*, Università degli studi Roma tre, 2014
26. Andromeda S.R.L. *Differenza tra elettrostimolazione e vibrazione*. In: 3.1. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
27. Andromeda S.R.L. *La vibrazione meccanica come forma di stimolazione propriocettiva*. In: 4. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
28. C. Bosco, R. Colli, E. Introini, M. Cardinale, O. Tsarpela, A. Madella, J. Tihanyi, A. Viru. *Adaptive responses of Human skeletal muscle to vibration exposure*. *Clinical Physiology* 19,2:183-187, 1999.
29. Andromeda S.R.L. *Focal Vibration (FV): il percorso scientifico*. In: 5.1. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
30. Andromeda S.R.L. *Multi focal vibration (Keope MFV) struttura ideata per creare effetti positivi indotti da più vibrazioni meccaniche focali*. In: 5.2. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
31. Andromeda S.R.L. *Un protocollo di applicazione della vibrazione al corpo umano*. In: 6. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
32. L. Fattorini, A. Ferraresi, A. Rodio, G.B. Azzena, G.M. Filippi. *Motor performance changes induced by muscle vibration*. *Eur J Appl Physiol* 2006;98:79-87
33. B. Marconi, G.M. Filippi, G. Koch, C. Pecchioli, S. Salerno, R. Don, F. Camerota, V.M. Saraceni, C. Caltagirone. *J Neurol Sci* 2008;275:51-59

34. Andromeda S.R.L. *Gli effetti della vibrazione sul sistema ormonale*. In: 7.1. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
35. *Nerve growth factor*. [https://it.wikipedia.org/wiki/Nerve\\_growth\\_factor](https://it.wikipedia.org/wiki/Nerve_growth_factor) (Ultima connessione 19/03/2020)
36. *Nerve growth factor*. <http://www.treccani.it/enciclopedia/nerve-growth-factor/> Ultima connessione 19/03/2020)
37. Hu Xiao, Dechang Wang, Ran Huo, Yibing Wang: *Mechanical tension promotes skin nerve regeneration by upregulating nerve growth factor expression*, Neural Regen Res, 8(17): 1576–1581, 2013 Jun 15
38. Andromeda S.R.L. *Gli effetti della vibrazione sul sistema muscolo scheletrico*. In: 7.2. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
39. Andromeda S.R.L. *Gli effetti della vibrazione sul tessuto osseo*. In: 7.3. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
40. Andromeda S.R.L. *Gli effetti della vibrazione sull'obesità e sull'osteoporosi*. In: 7.5. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
41. Andromeda S.R.L. *Gli effetti della vibrazione nella terapia del dolore*. In: 7.6. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
42. Andromeda S.R.L. *Gli effetti della vibrazione sulla circolazione sanguigna*. In: 7.7. *La vibrazione meccanica*, Andromeda S.R.L., 7 luglio 2014
43. J.B.J. Zwaferink, J.M. Hijmans, C.M. Schrijver: *Mechanical Noise Improves the Vibration Perception Threshold of the Foot in People With Diabetic Neuropathy*, J Diabetes Sci Technol, 14(1):16-21, 2018 Oct 17.
44. A.A. Priplata, B.L. Patritti, J. B. Niemi, Richard Hughes, D.C. Gravelle, L.A. Lipsitz, A. Veves, J. Stein, P. Bonato, J.J. Collins: *Noise-enhanced balance control in patients with diabetes and patients with stroke*, Annals of Neurology, 22 December 2005
45. F. Stocchi, P. Sale, A.F.R. Kleiner, M. Casali, V. Cimolin, F. de Pandis, G. Albertini, M. Gallia: *Long-term effects of automated mechanical peripheral stimulation on gait patterns of patients with Parkinson's disease*, Int J Rehabil Res, 38(3): 238–245, 2015 Sep
46. *Eccentric Rotating Mass Vibration Motors – ERMs*. <https://www.precisionmicrodrives.com/vibration-motors/eccentric-rotating-mass-vibration-motors-erms/> (Ultima connessione 19/03/2020)
47. Leonardo Bertini, *Analisi di vibrazioni forzate*, materiale didattico, Università di Pisa
48. *Haptics technology: picking up good vibrations*. <https://www.eetimes.com/haptics-technology-picking-up-good-vibrations/#> (Ultima connessione 19/03/2020)

49. *Haptics technology: picking up good vibrations.* <https://medium.com/iotforall/intro-to-haptic-technology-368340400375> (Ultima connessione 19/03/2020)
50. A.R., Ganji, A.J. Wheeler. *Engineering Experimentation*, cap 3, 3 ed., United States, Pearson College Div, 28 dicembre 2009
51. Analog Devices, AMP04 Datasheet
52. *Trigger\_di\_Schmitt.* [https://it.wikipedia.org/wiki/Trigger\\_di\\_Schmitt](https://it.wikipedia.org/wiki/Trigger_di_Schmitt) (Ultima connessione 19/03/2020)
53. *NE555.* <http://www.edutecnica.it/elettronica/ne555/ne555.htm> (Ultima connessione 19/03/2020)
54. Texas Instruments, NE555 Datasheet