



# UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di laurea triennale in INGEGNERIA ELETTRONICA

### **TESI DI LAUREA:**

“Ottimizzazione di un sensore magnetico per l’ausilio ad atleti non vedenti e ipovedenti e valutazione della sicurezza elettromagnetica”

"Optimization of a magnetic sensor to help blind and partially sighted athletes and evaluation of electromagnetic safety"

### **Relatore:**

Prof. Paola Russo

### **Studente:**

Curi Daniele

### **Correlatore:**

Prof. Alfredo De Leo

Anno accademico 2021/2022



## INDICE

### 1. INTRODUZIONE

- 1.1 Discipline paralimpiche: ATLETICA
- 1.2 Corsa per soggetti non vedenti e/o ipovedenti
- 1.3 Ruolo dell'Atleta Guida

### 2. CAPITOLO 1

#### **Progetto infrastruttura fissa per guida autonoma di un soggetto non vedente**

- 2.1 Infrastruttura fissa, il loop
  - 2.1.1 Valutazione impedenza del loop
- 2.2 Infrastruttura fissa, Il generatore

### 3. CAPITOLO 2

#### **Progetto sensore mobile indossabile per guida autonoma di un soggetto non vedente**

- 3.1 Unità ricevente – modello teorico
- 3.2 Unità ricevente – Hardware

### 4. CAPITOLO 3

#### **Ottimizzazione del sensore già esistente**

- 4.1 Problemi riscontrati nel progetto già esistente
- 4.2 Ottimizzazione del sensore
  - 4.2.1 Valutazioni teoriche bobina aggiuntiva
- 4.3 Valutazione delle tensioni indotte
- 4.4 Confronto modelli geometrici per le spire

### 5. CAPITOLO 4

#### **Valutazione sicurezza elettromagnetica**

- 5.1 Misure relative alla sicurezza per l'uomo

### 6. CONCLUSIONI

- 6.1 Appendice

# 1.INTRODUZIONE

Lo sport ha da sempre un ruolo fondamentale nella vita della persona. E' un incentivo alla socializzazione, un antidepressivo naturale per l'anima e l'umore, un modo per mantenere giovane ed attivo il corpo.

È importantissimo per i bambini, ma anche per gli adolescenti e gli adulti, aiuta il bambino ad imparare a lavorare in squadra e a creare gruppo, supporta l'adolescente nella fase dello sviluppo, rilassa e svaga l'adulto dallo stress del lavoro e della vita quotidiana.

Vista l'importanza della presenza dello sport nella vita dell'uomo comune, si pensi l'aiuto sia morale che fisico che riesce a dare l'attività sportiva nella vita di una persona con disabilità, che sia questa fisica o cognitiva.

Per un disabile la pratica regolare dell'attività sportiva riveste quindi numerosi vantaggi, tra i quali migliorare le qualità fisiche, potenziare gli aspetti cognitivi e psichici, sviluppare e mantenere rapporti sociali e relazionali.

Svolgere un'attività motoria induce inoltre l'organismo alla produzione di endorfine, sostanze chimiche che hanno effetti positivi sull'umore generale dell'uomo e sulla regolazione del sonno. La persona che pratica uno sport, quindi, vedrà diminuire l'ansia, lo stress e il nervosismo, si sentirà in generale sia emotivamente che fisicamente più rilassata.<sup>1</sup>

La pratica sportiva (agonistica o non) aiuta ancor più le persone con disabilità a sviluppare maggiore equilibrio e a potenziare il tono muscolare consentendo loro di maneggiare più facilmente gli ausili. Un atleta disabile sarà quindi in grado di muoversi correttamente nello spazio, acquisendo e incrementando le sue abilità, spesso riesce meglio a raggiungere un ottimo livello di autonomia motoria volontaria.

Attraverso questa esperienza hanno la possibilità di inserirsi o di reinserirsi in un contesto sociale. All'interno del mondo sportivo le interazioni che si instaurano sono, infatti, molteplici e di diverso tipo; si entra in contatto con l'allenatore, con i compagni, nel caso degli sport di squadra, e con gli

---

<sup>1</sup> <http://www.stateofmind.it/2017/05/empowerment-sport-disabilita>

avversari. Questa complessità di interazioni sociali che l'atleta disabile può sperimentare, gli consente di provare nuove e molteplici emozioni ed imparare a gestire possibili conflitti relazionali.

L'attività sportiva rappresenta quindi una parte fondamentale in ogni soggetto, specialmente per le persone con disabilità mentale, che vedono lo sport come una nuova esperienza da affrontare da sole, senza l'aiuto dei genitori o dei tutori, da cui solitamente dipendono.<sup>2</sup>

### **1.1 Discipline paralimpiche: ATLETICA**

Focalizzando l'attenzione solamente su una parte delle tante discipline, consideriamo l'Atletica Leggera che, è governata a livello internazionale dall'International Paralympic Committee con il coordinamento della propria specifica Commissione Tecnica.

È uno degli sport più popolari del panorama paralimpico internazionale ed è praticato in più di cento paesi in tutto il mondo, può essere infatti considerata la prima disciplina nata dello sport paralimpico.

Le gare, come nella disciplina olimpica, si suddividono in corse su pista e su strada e concorsi.

A seconda della tipologia di disabilità e dalla classificazione funzionale attribuita, gli atleti possono gareggiare in carrozzina, in piedi con o senza protesi sportive, o con un una guida nel caso di corridori ipovedenti o non vedenti.

Di seguito verranno riassunte le classificazioni di cui sopra.

#### **Le classificazioni<sup>3</sup>**

- T/F 11-13 Atleti con diversi gradi di menomazione visiva (anche detti visually impaired o ipovedenti)
- T/F 20 Atleti con disabilità intellettiva
- T/F 31-38 Atleti cerebrolesi (sia in piedi che in carrozzina)
- T/F 40-46 Atleti con diversi tipi di amputazione; atleti affetti da nanismo ed i cosiddetti altri (altre tipologie di disabilità)
- T/51-54 Atleti in carrozzina (in questa categorie possono gareggiare sia i paraplegici che gli amputati che scelgono di non gareggiare in piedi con protesi)
- F/51-58 Atleti che gareggiano seduti sul campo di gara

Dove T è track=gare su pista e F è field=concorsi.

---

<sup>2</sup> <http://www.stateofmind.it/2017/05/empowerment-sport-disabilita>

<sup>3</sup><https://www.disabili.com>

## **1.2 Corsa per soggetti non vedenti e/o ipovedenti**

Per il tipo di progetto realizzato occorre concentrarsi sull'attività sportiva, o meglio sulla corsa, per soggetti ipovedenti e/o non vedenti.

Per poter svolgere l'attività di corridore, l'atleta non vedente necessita di qualcosa o qualcuno che sia in grado di guidare l'atleta nei suoi spostamenti e che gli faccia seguire il giusto percorso, che sia in pista o su strada. Normalmente durante le gare ufficiali, l'atleta deve indossare occhiali particolari e deve essere collegato ad un corridore vedente mediante una corda non estensibile, per cui la distanza tra loro non supera mai i 50-60 cm. Questo ruolo di guida è ricoperto dal così detto "Atleta Guida".

Questa restrizione può avere conseguenze importanti sulle prestazioni e sull'autonomia dell'atleta.

## **1.3 Ruolo dell'Atleta Guida**

Per una persona cieca o ipovedente, poter contare sull'affiancamento di un atleta guida che lo segua passo-passo durante gli allenamenti, aiutandolo ad evitare gli ostacoli e a rendere i movimenti fluidi e precisi significa poter praticare al meglio uno sport. Vediamo perciò a cosa serve nello specifico la guida di un'atleta cieco: nell'atletica, in particolare nella corsa, le guide fungono da "accompagnatori" in pista durante le gare, gli allenamenti e le prove. Anche nel baseball esiste la guida: di solito è l'allenatore, che tramite la voce direziona il battitore verso le basi. Nello sci di fondo invece c'è un altro sciatore che precede o segue l'atleta in modo da poterlo guidare. La collaborazione e il rapporto che si instaura tra atleta e la sua guida è quindi strettissimo e necessita di giungere a un livello di grande sintonia, infatti una collaborazione ottima può portare a grandi risultati.

In Italia questa figura è poco conosciuta, e poche sono, quindi, le persone che si dedicano a formarsi come atleti guide: una onlus dedicata è quella di 'Disabilincorsa', che si occupa di far incontrare atleti e persone che vogliono fare le guide, ma per il resto, molto è lasciato ai singoli.

La mancanza di persone che si dedichino all'attività di guida dei soggetti, e l'idea di rendere l'atleta disabile libero, senza dover cioè dipendere da un'altra figura che lo accompagna, hanno incentivato lo sviluppo di sistemi per la guida autonoma della persona disabile. Con questi sistemi di nuova creazione, l'atleta non vedente riesce a muoversi liberamente e autonomamente all'interno dell'area di gara, guidato non più dalla sua guida strettamente legata a lui, ma da una serie di sensori ancorati al suo corpo che lo indirizzano, con stimoli sonori o vibrazionali, lungo il giusto percorso.

Naturalmente la tecnologia non riuscirà mai a sostituire completamente il ruolo dell'atleta guida, in quanto il rapporto umano e di fiducia tra guida e atleta non sarà mai uguale al rapporto che si instaurerà tra l'atleta e i sensori a lui ancorati. La nuova tecnologia però può dare nuovi stimoli all'atleta disabile, in quanto lo può portare a raggiungere degli obiettivi in modo autonomo, non dipendendo da nessuno, e non dovrà quindi condividere il suo risultato con la sua guida, ma sarà un traguardo raggiunto con le proprie forze e con la propria voglia di libertà.

## 2. CAPITOLO 1

### Progetto infrastruttura fissa per guida autonoma di un soggetto non vedente<sup>4</sup>

Vengono continuamente, al giorno d'oggi, compiuti sforzi significativi per rimuovere le importanti barriere che un portatore di disabilità può incontrare nella vita di tutti i giorni.

Ausili elettronici intelligenti in grado di assistere i non vedenti durante la deambulazione quotidiana in ambienti sconosciuti interni ed esterni sono già stati creati. La maggior parte di questi dispositivi si basa su sensori ottici o a ultrasuoni, ma recenti studi hanno dimostrato la possibilità di utilizzare la tecnologia elettromagnetica per realizzare un efficiente sistema di rilevamento di ostacoli, con dei numerosi vantaggi rispetto all'uso degli altri sistemi.

Al contrario, mancano dispositivi intelligenti progettati specificamente per migliorare l'indipendenza dei corridori ipovedenti. Alcuni progetti sono stati fatti e sviluppati ma nessuno di essi è effettivamente utilizzato o è stato ancora commercializzato. L'idea è quella di sviluppare un sistema idoneo alla corsa autonoma di un atleta non vedente, a partire dalle idee e dai progetti già esistenti nel campo della guida autonoma.

Questa tesi cerca di ovviare a queste mancanze con la presentazione di un progetto che sfrutta la generazione e il rilevamento di campi elettromagnetici, a frequenze non dannose per l'uomo, per la guida di corridori ciechi.

Questo sistema è costituito da due parti principali, un'infrastruttura fissa incorporata al terreno della pista di atletica, e da un sensore che l'atleta dovrà indossare. Il funzionamento in linea generale è il seguente, verranno poi trattate nel dettaglio tutte le varie parti del sistema e il loro funzionamento specifico.

La parte fissa è designata alla generazione di un segnale elettromagnetico che verrà poi captato dal sensore indossato dal soggetto non vedente, elaborato ed utilizzato per generare un avviso diretto sulla posizione del corridore sulla pista. Quando l'atleta si avvicina troppo ai bordi della sua corsia, sui quali sono installati dei conduttori fissi, il sensore rileva un segnale che servirà a pilotare dei sistemi vibrazionali indossati come bracciali dall'atleta, che lo avviseranno intensificando o meno la vibrazione in base alla correttezza o meno sua posizione nella corsia.

Nei paragrafi successivi verrà trattata dettagliatamente la progettazione dell'infrastruttura fissa.

---

<sup>4</sup>Vittorio M. N. Passaro, An Electromagnetic Sensor for the Autonomous Running of Visually Impaired and Blind Athletes (Part I: The Fixed Infrastructure), MPDI, 2017.

## 2.1 Infrastruttura fissa, il loop

La parte fissa, composta da due semplici fili conduttivi e da un apposito generatore a radiofrequenze, è una struttura che deve essere installata sulla pista o sul percorso che l'atleta deve seguire per disputare la gara. È stato progettato un sistema da inserire su una pista d'atletica standard di 400m. I fili, CTX1 e CTX2, di sezione di 2,5 mm, devono essere posti a una distanza costante tra loro. Possono essere appoggiati al terreno se si intende creare un sistema smontabile, possono invece essere interrati al di sotto del manto della pista se si intende creare un impianto fisso. Questi conduttori sono percorsi da una corrente  $I_1$  e  $I_2$ , generata da un apposito circuito che produce un certo segnale adatto e pensato appositamente per il suo scopo, ossia quello di generare un campo elettromagnetico rispettivamente  $B_1$  e  $B_2$ . I due fili paralleli creano quindi una sorta di corridoio invisibile, composto dai campi elettromagnetici  $B_1$  e  $B_2$ , che servirà poi, tramite il sensore indossabile, a far restare il corridore all'interno di questo corridoio 'sicuro'.



Figura 1: Rappresentazione del posizionamento dell'infrastruttura fissa su una pista

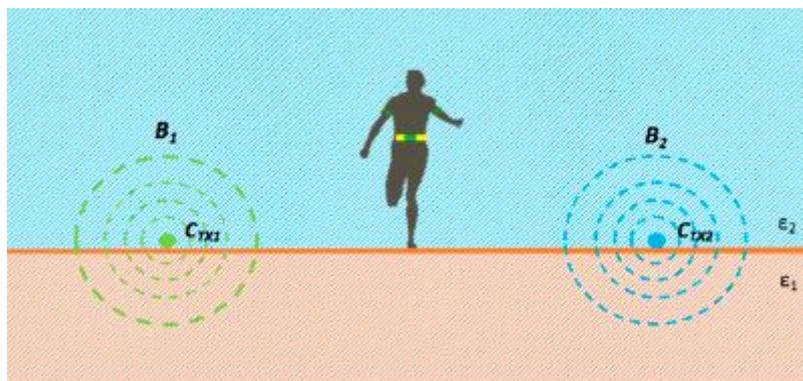


Figura 2: sezione trasversale della pista che mostra la posizione del corridore all'interno del corridoio sicuro generato dall'infrastruttura fissa



Figura 3: fotografia del loop creato sperimentalmente su pista.

### 2.1.1 Valutazione impedenza del loop

Il loop composto dai due fili è come detto appoggiato al terreno, quindi si trova in corrispondenza della superficie di separazione tra due diversi tipi di dielettrico, il terreno e l'aria. Sarà quindi necessario valutare l'impedenza del loop tenendo conto di queste condizioni.

La funzione di Green di un mezzo stratificato è nota analiticamente, questo ci permette di esprimere l'impedenza del circuito del loop a terra in una forma chiusa. Applicando la legge di Faraday al loop otteniamo la rappresentazione circuitale della struttura:

$$-V_0 + I_0 \frac{C}{\sigma 2\pi a \delta} = k_0^2 \oint_C \overline{\overline{\Pi}}(\overline{I}_0) \cdot d\overline{l} \quad (1)$$

Dove:

- C è la lunghezza del loop
- $\pi$  è il potenziale di Hertz
- $\sigma$  la conduttività del filo
- a è il raggio del filo
- $\delta$  la profondità di penetrazione nel filo

Nella (1), l'induttanza interna del filo viene trascurata perché è molto più piccola di quella esterna. Inserendo in (1) l'espressione di  $\pi$ , e definendo l'impedenza come  $Z_L = V_0 / I_0$ , si ottiene la (2):

$$Z_L = \frac{R}{\sigma a \delta} + \frac{\omega \mu_0 R^2}{8\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \xi \, d\xi \, d\alpha \frac{2e^{-\gamma_1 a}}{(\gamma_1 + \gamma_2)} \cdot e^{j\xi R[\cos(\alpha - \phi) - \cos(\alpha - \phi')]} \right] \cos(\phi - \phi') \, d\phi \, d\phi' \quad (2)$$

Dove:

$$\gamma_1 = \sqrt{k_1^2 - \xi^2}; \gamma_2 = \sqrt{k_2^2 - \xi^2} \quad (3)$$

Nella (2), il primo termine indica la resistenza del cavo, mentre il secondo termine permette una valutazione dell'impedenza del cavo considerando la presenza della massa dispersa;  $k_1$  e  $k_2$  sono numeri d'onda rispettivamente per spazio libero e terreno. Nella (2), è stata adottata l'ipotesi di una pista circolare di raggio  $R$ , con una lunghezza totale pari a quella di uno stadio reale. Questo porta ad una significativa riduzione dello sforzo computazionale, con un effetto trascurabile sulla precisione. Per la valutazione della (2) l'integrale sulla variabile spettrale  $\zeta$  è stato calcolato numericamente fino a un valore asintotico appropriato  $\zeta_{as}$ , e poi la parte asintotica dell'integrale è stata valutata con il metodo della fase stazionaria. Per convalidare il metodo teorico, un confronto tra calcolato e misurato è stato eseguito considerando un filo di lunghezza  $C = 400$  m giacente su terreno comune, le cui proprietà dielettriche sono state scelte come  $\epsilon_r = 10$  e  $\sigma = 1$  S / m. Si ottiene un valore di  $ZL = 41 + j586 \omega$ , il che implica un valore di induttanza di circa 900 H. In realtà, il valore di  $ZL$  dipende dal tipo di terreno. Purtroppo i valori dei parametri elettrici del terreno non lo sono noti con precisione, quindi è difficile effettuare un confronto tra dati teorici e situazioni sperimentali. La tabella 1 riporta i valori dell'impedenza misurata per il filo steso su tre diverse superfici tipiche.

Scenario	Z [ $\Omega$ ]	L [mH]
Soil	41.1 + j528	0.842
Tarmac	62 + j604	0.961
Tartan	151 + j740	1.178

Tabella 1: valori misurati di impedenza e induttanza del loop su diversi terreni

Vale la pena osservare che il valore della resistenza evidenzia la necessità di un approccio rigoroso: se consideriamo solo le perdite ohmiche del filo, otteniamo il valore di 5 w, circa un ordine di grandezza inferiore rispetto ai valori misurati o calcolati. La grande differenza è dovuta alla densità di corrente dispersa a terra e da quella indotta dal campo magnetico generato dai cavi.

La conoscenza dell'impedenza, e quindi del carico visto dal generatore, ci permette di ottimizzare il design del sistema. In particolare, un disadattamento tra il generatore e il carico può causare riflessione di potenza, pericolosa per il circuito elettronico, fornendo una corrente troppo bassa tale che il sistema non può essere usato.

## 2.2 Infrastruttura fissa, Il generatore

Questa sezione descrive accuratamente la generazione del segnale, che consiste in una portante sinusoidale alla frequenza  $f = 100$  kHz, modulata in ampiezza da un'onda quadra. La corrente generata è un impulso con un'ampiezza da picco a picco di almeno 300 mA, per avere una tensione rilevabile e utilizzabile dal sensore mobile. La *figura 4* rappresenta l'andamento del segnale nei due fili, mentre il circuito di generazione del suddetto è mostrato in *figura 5*.

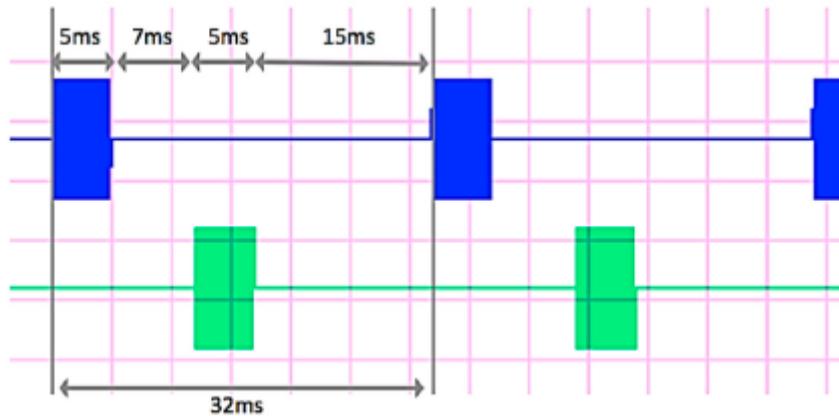


Figura 4: grafico del segnale generato dal generatore per i due fili

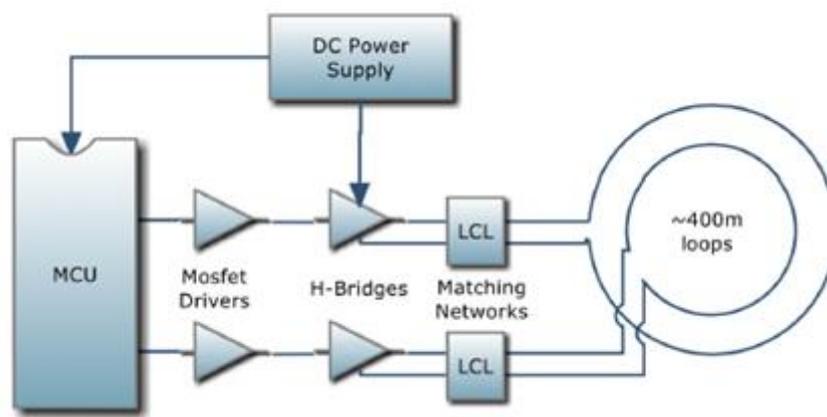


Figura 5: schema del generatore di segnale

Il segnale del primo filo è un impulso con un periodo di 32 ms e una durata di 5 ms (traccia blu in Figura 4). Lo stesso segnale viene inviato al secondo filo con un ritardo di 7 ms (traccia verde in Figura 4). Dal grafico si nota che il segnale si ripete dopo un certo tempo di delay, in modo che ogni nuovo impulso sul primo filo viene generato 15 ms dopo che ogni impulso sul secondo filo è terminato. Questa tecnica è ideale per fare in modo che l'unità ricevente riesca a differenziare il campo magnetico generato da ciascuno dei due fili, in quanto riceverà solamente un campo alla volta e conoscendo le tempistiche di invio di ogni segnale riuscirà a determinare esattamente la posizione del corridore.

Per quanto riguarda il collegamento del loop al circuito si riscontra un fondamentale problema. Il valore teorico dell'impedenza di ingresso del loop, che è stato calcolato e discusso nel paragrafo 2.1.1, è alto, quindi è necessario progettare una rete di adattamento adeguata in modo che lungo il filo scorra la corrente desiderata. Per ovviare a questo inconveniente è stata progettata la rete di figura 6.

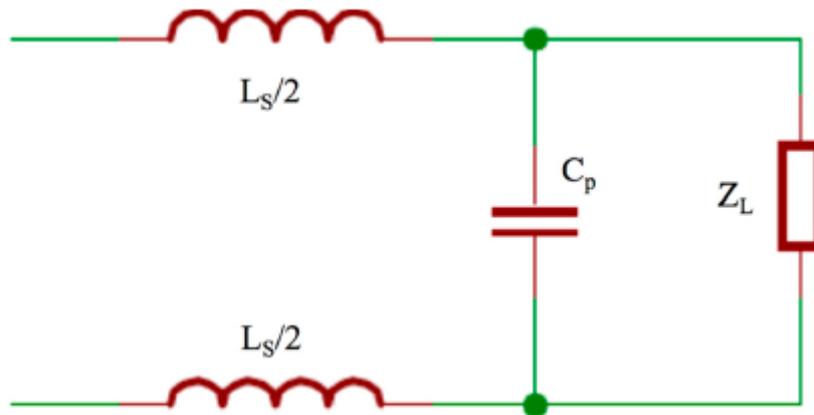


Figura 6: rete di adattamento tra generatore e loop.

La capacità  $C_p$  in parallelo compensa l'induttanza di carico  $Z_L$ , mentre le induttanze  $L_s/2$  in serie forniscono il valore di resistenza desiderato per il generatore.

Al fine di progettare una rete adeguata, sono state eseguite ulteriori misurazioni per valutare le effettive condizioni di carico, tenendo conto anche dell'accoppiamento tra i due cavi. Queste misure sono riassunte in *Tabella 2*.

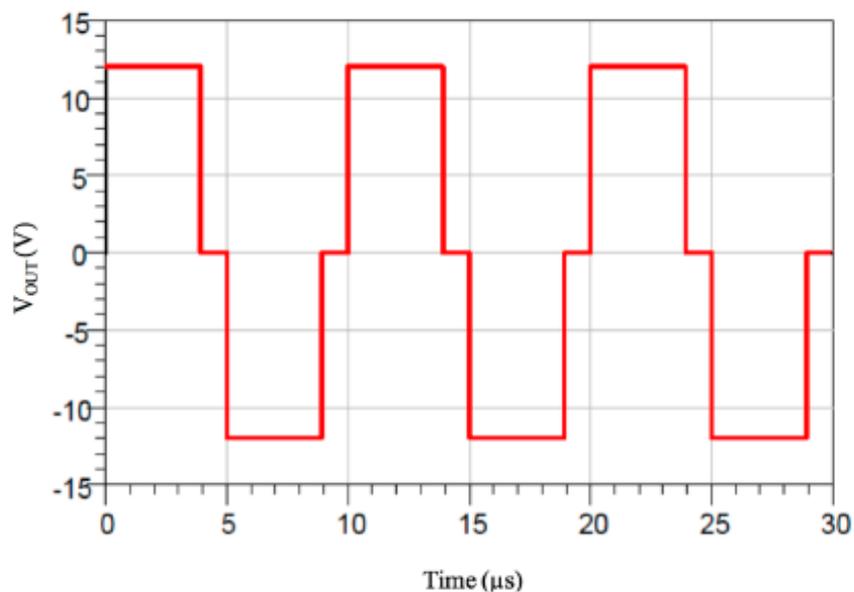
Cable Measured	$Z_L$ [ $\Omega$ ] at 100 kHz
Internal cable (without external cable)	151 + j740
Internal cable (open circuited external cable)	143 + j755
Internal cable (short circuited external cable)	125 + j747
External cable (without internal cable)	100 + j744
External cable (open circuited internal cable)	108 + j740
External cable (short circuited internal cable)	93.2 + j737

Tabella 2: misure di  $Z_L$  in funzione delle condizioni di accoppiamento.

Una volta che  $Z_L$  è noto, è stato scelto un induttore ad alta potenza disponibile in commercio, considerando due vincoli principali: il valore  $L_s$  deve limitare al massimo la corrente fornita dal generatore di 15 A e la corrispondente resistenza parassita  $R_s$  deve essere sufficientemente bassa da ridurre le perdite ohmiche interne. La  $L_s$  scelta è 29 H con una corrispondente  $R_s$  di 0,92  $\omega$ . Infine, è stato calcolato l'apposito  $C_p$  in grado di caricare il generatore con una pura impedenza resistiva. Utilizzando i valori ottenuti, la corrente simulata che scorre sul filo, con un'alimentazione di 12 Vdc, è stata di 476 mA da picco a picco, che soddisfa il requisito di essere superiore a 300 mA.

La generazione di una semplice onda quadra alla frequenza di 100 kHz è stata implementata utilizzando un microcontrollore (MCU). Poiché, per questa funzione, sono necessarie pochissime risorse in termini di ROM, RAM e numero di pin, il microcontrollore scelto è un Atmel AVR ATtiny44 (4096 byte di memoria flash, 320 byte di RAM, 256 byte di Eeprom). Per lo stadio finale, che inietta corrente nell'anello lungo 400 m, è stato utilizzato come driver un ponte H, per consentire ad entrambe le polarità di alimentare il loop, raddoppiando così la tensione / corrente di pilotaggio, rispetto a un driver a singolo interruttore.

Tra i pin del microcontrollore e ogni ponte sono stati inseriti alcuni driver di corrente con lo scopo di velocizzare la carica / scarica dei gate dei Mosfet e per garantirne la piena conduzione. Per impedire la conduzione simultanea dei Mosfet dello stesso ramo del ponte, è stato aggiunto un delay durante le transizioni. La forma d'onda risultante è pertanto un'onda quadra modificata, e la tensione ai terminali del generatore è quella rappresentata in *figura 7* per il caso di alimentazione di 12 Vdc.



*Figura 7: andamento tensione generata dal generatore*

La frequenza di 100 kHz è ottenuta alimentando con una tensione di +12 V per 3.9375 μs, poi un tempo morto (0V) per 1.0625 μs (tutti i mosfet spenti), quindi l'uscita viene invertita -12 V per 3,9375 μs e infine di nuovo un tempo morto di 1,0625 μs. Il periodo di tempo totale è ovviamente di 10 μs, la cui precisione dipende dall'oscillatore a cristallo da 16 MHz utilizzato, che ha 0,5% di tolleranza in frequenza e lo 0,3% di stabilità in frequenza.

Per quanto riguarda le misure sperimentali, la corrente misurata che scorre sul filo è  $I_{pk-pk} = 450$  mA, un valore leggermente inferiore a quello simulato, ma probabilmente dovuto all'incertezza di misura di alcuni componenti.

Vale la pena inoltre notare che la soluzione di progettare un generatore che crei un'onda a divisione di tempo semplifica il ricevitore hardware, che non deve avere la capacità di discriminare da quale filo riceve il campo; questa scelta però viene pagata con un'implementazione software del generatore più complessa. La caratteristica più importante della soluzione adottata è la notevole riduzione della quantità di potenza dissipata dal trasmettitore, che fornisce solo brevi raffiche di onde da 100 kHz a ciascun canale, con un duty cycle del 15,6% per ogni filo (5 ms su un periodo totale di 32 ms).

Per concludere la trattazione dell'infrastruttura fissa si possono fare alcune considerazioni sulle scelte di progetto, sull'utilizzo e sulle peculiarità di questo sistema.

Per descrivere il comportamento elettromagnetico è stato utilizzato un approccio rigoroso, considerando i campi in un mezzo stratificato e consentendo di tenere conto degli effetti delle correnti indotte nel terreno sul valore dell'impedenza del loop. La conoscenza del carico corretto visto dal generatore ci ha dato la possibilità di ottimizzare la progettazione del sistema ed in particolare di introdurre un adeguato abbinamento generatore-rete in modo da ottenere il valore desiderato per le correnti e quindi per i campi magnetici. L'intera struttura di trasmissione proposta in questo documento è stata realizzata con componenti commerciali standard e quindi economici e di facile installazione. Inoltre, le dimensioni della corsia realizzata, consente l'utilizzo dell'infrastruttura da parte di più atleti contemporaneamente senza interferenze.

### 3. CAPITOLO 2

#### Progetto sensore mobile indossabile per guida autonoma di un soggetto non vedente<sup>5</sup>

In questo capitolo vengono trattati tutti gli aspetti progettuali ed il funzionamento del sensore indossabile atto al rilevamento dei campi generati dall'infrastruttura fissa. La parte mobile è essenzialmente composta da tre parti: il sensore per il rilevamento dei campi, un'unità di elaborazione che processa i dati rilevati, e dei sensori vibrazionali utilizzati per la segnalazione della posizione al corridore.



*Figura 8: infrastruttura mobile.*

Come mostrato in *figura 8*, le due parti di colore marrone sono i sensori vibrazionali indossabili come bracciali dal corridore, mentre la striscia bianca con una scheda integrata rappresentano rispettivamente il sensore per rilevare il campo (una spira) e il circuito di pilotaggio della spira.

Vale la pena notare che quando si progetta un dispositivo da indossare durante lo sport o in generale durante una qualsiasi attività fisica, è necessario tenere conto di requisiti specifici come comfort, peso e facilità d'uso. Ciò è particolarmente importante quando i soggetti che dovranno indossare questi ausili sono affetti da disabilità visive. Da un recente sondaggio si è evidenziato che i problemi principali che un soggetto non vedente trova nell'indossare oggetti estranei sono legati alle caratteristiche fisiche e l'aspetto dei dispositivi. Gli utenti vogliono dispositivi che siano discreti, poco appariscenti e facili da portare, che non siano accattivanti e alienanti, ma piccoli, leggeri e preferibilmente costituiti da una singola unità. Inoltre, molti utenti consideravano le mani libere una

---

<sup>5</sup>Vittorio M. N. Passaro, An Electromagnetic Sensor for the Autonomous Running of Visually Impaired and Blind Athletes (Part II: The Wearable Device), MPDI, 2017.

condizione estremamente importante. È quindi buona norma creare degli ausili che non vadano ad ostruire uno o più degli altri sensi (udito, tatto) estremamente utili a una persona non vedente.

Attualmente, la maggior parte dei sensori magnetici indossabili proposti in letteratura o disponibili sul mercato sono in grado di soddisfare le principali esigenze sopra elencate, soprattutto in termini di peso e ingombri ridotti. Tuttavia, per fornire queste caratteristiche, è necessario lavorare ad alte frequenze (oltre la gamma MHz). Questo è un punto critico, perché, come spiegato nella parte precedente di questo documento, per il sistema di binari elettrificati, è stata scelta la frequenza di lavoro  $f = 100$  kHz come buon compromesso perché soddisfaceva importanti requisiti di sistema, ma era anche abbastanza alta da indurre una tensione sufficiente al sensore ricevente pur essendo in grado di fornire una corrente uniforme lungo tutto il cavo.

Poiché nessuno dei sensori esistenti era adatto come sensore magnetico per il sistema di binari, è stato progettato e realizzato un dispositivo indossabile ad hoc.

Il design scelto è un anello piatto composto da 40 giri (spira con 40 avvolgimenti) e può essere indossato come cintura. I due campi magnetici generati dall'unità trasmittente inducono due diverse forze elettromotrici nel sensore ad anello piatto. Fondamentalmente, l'unità di elaborazione del segnale che è collegata al sensore, calcola la differenza tra le due tensioni generate dai due fili e consente di avere informazioni sulla posizione dell'utente all'interno della corsia. Se il valore della differenza supera una certa soglia, significa che l'atleta si sta avvicinando troppo ad uno dei confini e l'unità genera un segnale vibrazionale per avvertire l'utente.

Verranno ora descritte nel dettaglio tutte le scelte progettuali.

### **3.1 Unità ricevente – modello teorico**

In questa sezione viene presentato il modello teorico utilizzato per caratterizzare e ottimizzare i principali parametri del sistema ricevente. Per sviluppare il modello analitico, sono state adottate le seguenti ipotesi:

- il campo magnetico esterno al sensore è uniforme,
- il corpo umano su cui va applicato il sensore è stato rappresentato schematicamente come un cilindro omogeneo di materiale senza perdite avente raggio  $\rho_0$  e altezza  $2h$ .

Il modello teorico è rappresentato in *figura 9*.

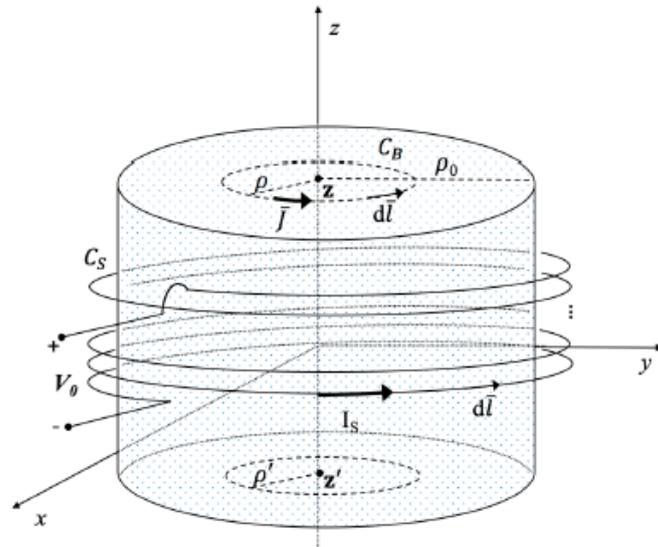


Figura 9: modello analitico del sensore indossato

Il sensore ricevente è composto da una cintura indossabile dall'utente, sulla quale sono stati applicati  $N$  avvolgimenti per formare una piccola spirala, il cui compito è quello di rilevare i campi magnetici generati dai due fili del gigantesco loop trasmittente giacente per terra.

Per calcolare la tensione indotta nella bobina di ricezione dai campi magnetici, è stato sviluppato un approccio teorico che considera anche l'accoppiamento reciproco tra il corpo e il ciclo di ricezione. La figura 10 mostra una rappresentazione elettrica del circuito in termini di parametri della matrice  $Z$ : il circuito a sinistra si riferisce al sensore (grandezze indicate con pedice  $S$  - sensor), mentre quello a destra è un modello di circuito concentrato della rete che modella il corpo (quantità denotate con il pedice  $B$  - body).

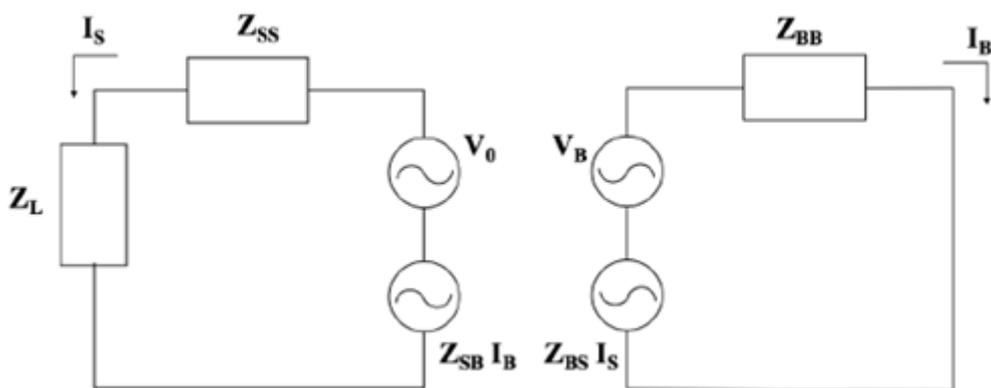


Figura 10: rappresentazione del circuito equivalente elettrico dell'accoppiamento sensore-corpo

Nel circuito di figura 10 la  $Z_{SB}=Z_{BS}$  rappresenta il mutuo accoppiamento tra sensore e corpo umano, mentre le  $Z_{SS}$  e  $Z_{BB}$  sono le impedenze rispettivamente del sensore e del corpo.

Applicando la legge di Faraday all'equazione che rappresenta l'interazione tra sensore e corpo umano, si ottengono i parametri della matrice Z.

$$V_0 - Z_W I_S = j\omega \oint_{S_W} \vec{A}(I_S) \cdot d\vec{l} + j\omega \oint_{S_W} \vec{A}(J) \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

$$\oint_{C_B} \frac{\vec{J}(\rho, z)}{\sigma_B} \cdot d\vec{l} = -j\omega \int_{S_B} \vec{B}_0 \cdot d\vec{S} - j\omega \oint_{C_B} \vec{A}(J) \cdot d\vec{l} - j\omega \oint_{C_B} \vec{A}(I_S) \cdot d\vec{l} \quad (5)$$

L'equazione (4) riguarda la bobina e gli integrali di linea sono calcolati lungo un percorso  $S_W$  sulla superficie del filo.  $Z_W = \frac{Nr}{\sigma a \delta}$  è l'impedenza ohmica del filo del sensore ( $a$  è il raggio del filo,  $\sigma$  la conduttività del rame, e  $\delta$  la profondità di penetrazione); e  $A(I_S)$  e  $A(J)$  sono i potenziali magnetici del vettore dovuti rispettivamente alla corrente  $I_S$  del sensore e alla densità di corrente  $J$  del corpo

L'equazione (5) riguarda il corpo. Gli integrali di linea sono calcolati lungo un generico percorso circolare  $C_B$ , e l'integrale di superficie rappresenta il flusso del campo esterno  $B_0$  attraverso la superficie  $S_B$ , su cui giace un piano parallelo al piano  $x - y$  e racchiuso da  $C_B$ ;  $\sigma_B$  è la conduttività del corpo. Il contributo alla tensione indotta nel sensore è dato dal campo esterno, che è generato dai fili stesi a terra (lunghezza  $L = 400$  m). Inoltre, abbiamo considerato che solo la componente  $z$  del campo (perpendicolare al suolo) è stata rilevata dalla bobina indossabile. Si vedrà poi in seguito che questa risulterà la scelta meno adatta, in quanto non consentirà di rilevare in modo corretto la posizione del corridore quando si avvicina notevolmente ai due conduttori a terra. Dovranno quindi essere apportate delle modifiche rispetto al posizionamento della bobina (sensore) rispetto a terra; sarà molto più efficace posizionare il sensore verticalmente al terreno, ma queste migliorie verranno trattate poi nei prossimi capitoli.

Con la seguente relazione è stato quindi calcolata solamente la componente  $z$  del campo magnetico, in quanto si è assunto che il sensore misuri il campo solo lungo la direzione  $z$ .

$$H_{0z} = \frac{1}{8\pi^2} \int_L I(x', y') \iint_{-\infty}^{\infty} [\zeta (d\vec{l} \cdot \hat{y}) - \eta (d\vec{l} \cdot \hat{x})] \frac{2e^{-j\gamma_1 z}}{(\gamma_1 + \gamma_2)} e^{j[\zeta(y-y') + \eta(x-x')]} d\zeta d\eta \quad (6)$$

$$\gamma_1 = \sqrt{k_1^2 - (\zeta^2 + \eta^2)}; \gamma_2 = \sqrt{k_2^2 - (\zeta^2 + \eta^2)} \quad (7)$$

dove  $k_1$  e  $k_2$  sono numeri d'onda rispettivamente per lo spazio libero e il suolo,  $\zeta$  e  $\eta$  sono le variabili spettrali di integrazione utilizzate per la rappresentazione della funzione di Green.

Nell'equazione (6), è stata considerata una pista circolare di raggio  $R$  di lunghezza totale pari a quella di uno stadio reale.

Sono stati quindi derivati tutti i parametri della matrice  $Z$  con le relazioni seguenti.

$$Z_{SS} = Z_W + j\omega \frac{\mu_0 r (r - a)}{4\pi} \int_{-\Phi_{max}}^{\Phi_{max}} \int_{-\Phi_{max}}^{\Phi_{max}} \frac{e^{-j\beta R_{SS}}}{R_{SS}} \cdot \cos(\phi - \phi') d\phi d\phi' \quad (8)$$

$$R_{SS} = \sqrt{r^2 + (r - a)^2 - 2r(r - a) \cos(\phi - \phi') + k^2(\phi - \phi')^2} \quad (9)$$

$$Z_{SB} = j\omega \frac{\mu_0 r}{4\pi} \int_{-\Phi_{max}}^{\Phi_{max}} \int_0^{\rho_0} \int_0^{2\pi} \int_{-h}^h g(\rho', z') \frac{e^{-j\beta R_{SB}}}{R_{SB}} \rho' \cdot \cos(\phi - \phi') d\rho' d\phi' dz' d\phi \quad (10)$$

$$R_{SB} = \sqrt{r^2 + \rho'^2 - 2r\rho' \cos(\phi - \phi') + (k\phi - z')^2} \quad (11)$$

$$Z_{BB} = \frac{1}{F_N} \left( \frac{2\pi}{\sigma} \int_{-h}^h \int_0^{\rho_0} g(\rho, z) w(\rho, z) \rho d\rho dz + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-h}^h \int_0^{\rho_0} w(\rho, z) \Psi(\rho, \phi, z) \cos(\phi - \phi') \rho d\rho d\phi dz \right) \quad (12)$$

$$R_{BB} = \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos(\phi - \phi') + (z - z')^2} \quad (13)$$

La motivazione per cui è stato necessario il calcolo di suddetti parametri è duplice: è utile alla valutazione dell'accoppiamento tra sensore e corpo umano, e dà la possibilità di avere a priori una caratterizzazione del sensore. Queste informazioni hanno consentito un miglior design e una più precisa ottimizzazione del sensore.

La *Tabella 2* riassume i principali parametri fisici del primo prototipo di sensore realizzato. Questi risultati sono quelli poi utilizzati per calcolare l'impedenza del sensore e l'accoppiamento con il corpo.

Radius of the Belt $r$ (m)	0.153
Thickness of the belt $t$ (m)	$5 \times 10^{-2}$
Cu Conductivity $\sigma$ (S/m)	$5.80 \times 10^7$
Section of the wire $a$ (m)	$0.15 \times 10^{-3}$
Body Conductivity $\sigma_B$ (S/m)	0.361

S = Siemens.

*Tabella 2: Parametri principali del sensore.*

La *Tabella 3*, invece, riassume i valori ottenuti espressi come impedenza, resistenza e induttanza.

	Z ( $\Omega$ )	R <sub>s</sub> ( $\Omega$ )	L <sub>s</sub> ( $\mu$ H)
Z <sub>SS</sub>	9.37 + j 534	9.37	850
Z <sub>BS</sub>	j 2.3237	/	3.6982
Z <sub>BB</sub>	44.63 + j 0.0383	44.63	0.0609

*Tabella 3: Valori calcolati della matrice Z.*

Analizzando la tabella 3, si può vedere che il valore di  $Z_{BS}$  è piccolo, il che significa che il mutuo l'accoppiamento tra il corpo e il sensore non è significativo e può essere trascurato; inoltre il termine  $Z_{BB}$  introduce solo un contributo resistivo, dovuto alle perdite ohmiche legate alle correnti in ingresso ai tessuti. L'informazione sul valore trascurabile di  $Z_{BS}$  è un risultato importante, poiché implica che il sensore indossabile può essere progettato indipendentemente dal corpo, evitando una procedura di calibrazione personalizzata per diversi atleti. Per validare i risultati ottenuti dal modello analitico, sono state effettuate delle misurazioni preliminari.

La *Tabella 4* mostra un confronto tra i valori di resistenza (R) e induttanza (L) misurati per tre diverse situazioni:

- Cintura avvolta attorno a un prototipo umano vuoto;
- Cintura avvolta intorno a un prototipo umano pieno di acqua salata;
- Cintura avvolta attorno a un corpo umano reale.
- Le misurazioni sono state riferite alla porta di ingresso del sensore. Come previsto dal modello teorico, la principale caratteristica da evidenziare indica che la presenza del corpo avvolto dalla bobina non produce una grande variazione nei parametri del sensore.

	R ( $\Omega$ )	L ( $\mu$ H)
Air	14.1	830
Water	14.6	836
Body	15	840

*Tabella 4: Parametri R ed L del sensore in diverse situazioni.*

### 3.2 Unità ricevente – Hardware

In questa sezione verrà descritto più dettagliatamente l'Hardware a supporto del funzionamento dell'unità ricevente.

Come illustrato nella *Figura 8*, la parte mobile è costituita da un sensore indossabile, una scheda elettronica personalizzata per l'acquisizione e la lavorazione del segnale e due dispositivi vibranti per comunicare un segnale di avvertimento all'atleta quando richiesto.

La bobina multi-giro di cui è composto il sensore magnetico è stata realizzata con un cavo a piattina flessibile (cioè indossato come cintura intorno ai fianchi o cucito su una maglietta o pantaloni) le cui estremità sono collegate all'ingresso ad alta impedenza di un amplificatore operazionale e alla massa del circuito. Un condensatore discreto è stato aggiunto tra questi due terminali per spostare la frequenza di risonanza complessiva più vicino alla frequenza di lavoro.

Come ampiamente spiegato nel capitolo 1, il segnale è una sequenza di due picchi separati l'uno dall'altro circa 7 ms e ripetuti ogni 32 ms. Dopo l'amplificazione, il segnale entra in un filtro passa banda del secondo ordine, che viene poi nuovamente amplificato e rettificato.

Si ottiene quindi un segnale passa-basso, filtrato per ridurre le increspature, e quindi inviato a un buffer per poi entrare nel convertitore analogico-digitale (AD) del microcontrollore (MCU). La struttura del circuito di elaborazione del segnale è mostrata in *Figura 11*.

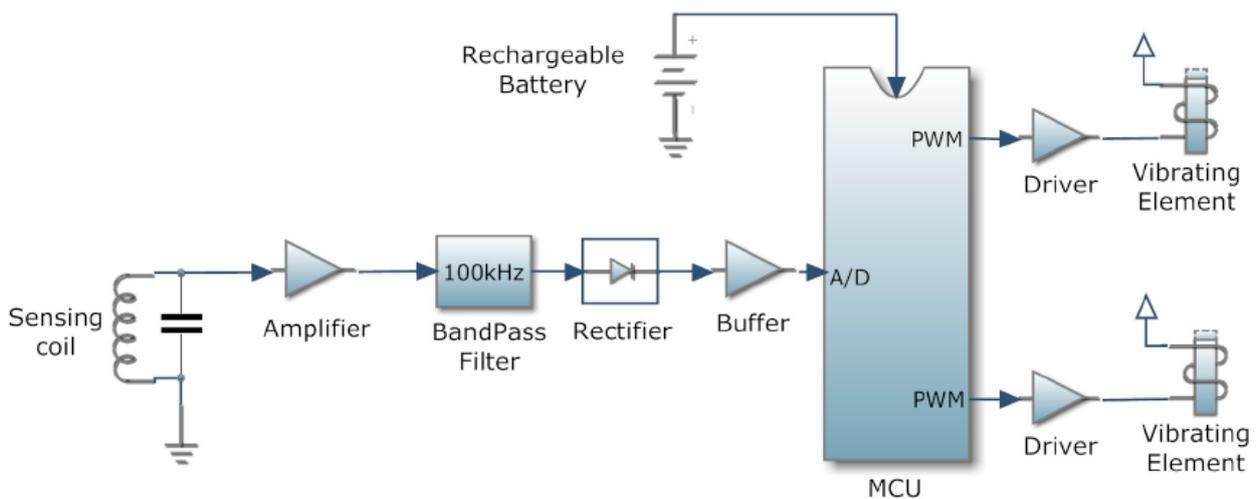


Figura 11: Schema a blocchi del circuito di elaborazione del segnale del ricevitore.

Il firmware del microcontrollore implementa un buffer circolare lungo 32 ms con un periodo di campionamento  $T_s = 256\mu s$  (cioè 125 campioni, corrispondenti a una frequenza di campionamento di circa 3,9 kHz). Quando il ricevitore non rileva alcun segnale per un tempo superiore a  $T_p = 40 * T_s = 10,24$  ms, esegue la scansione del buffer a ritroso cercando di identificare due picchi consecutivi con una pausa intermedia di non più di 10 ms.

Ciò significa che quando 40 campioni consecutivi sono al di sotto di un livello di rumore (dove il livello è circa il 4% del range del convertitore AD), l'intero buffer viene valutato per determinare le ampiezze dei due picchi che si trovano ad una distanza approssimativa di 7 ms.

Per evitare trigger persi, il calcolo deve concludersi prima che si verifichi la successiva lunga pausa (ad esempio, sono necessari 22 ms per scansione le altezze dei picchi per una sequenza di 125 campioni, come mostrato dal grafico di *Figura 12*).

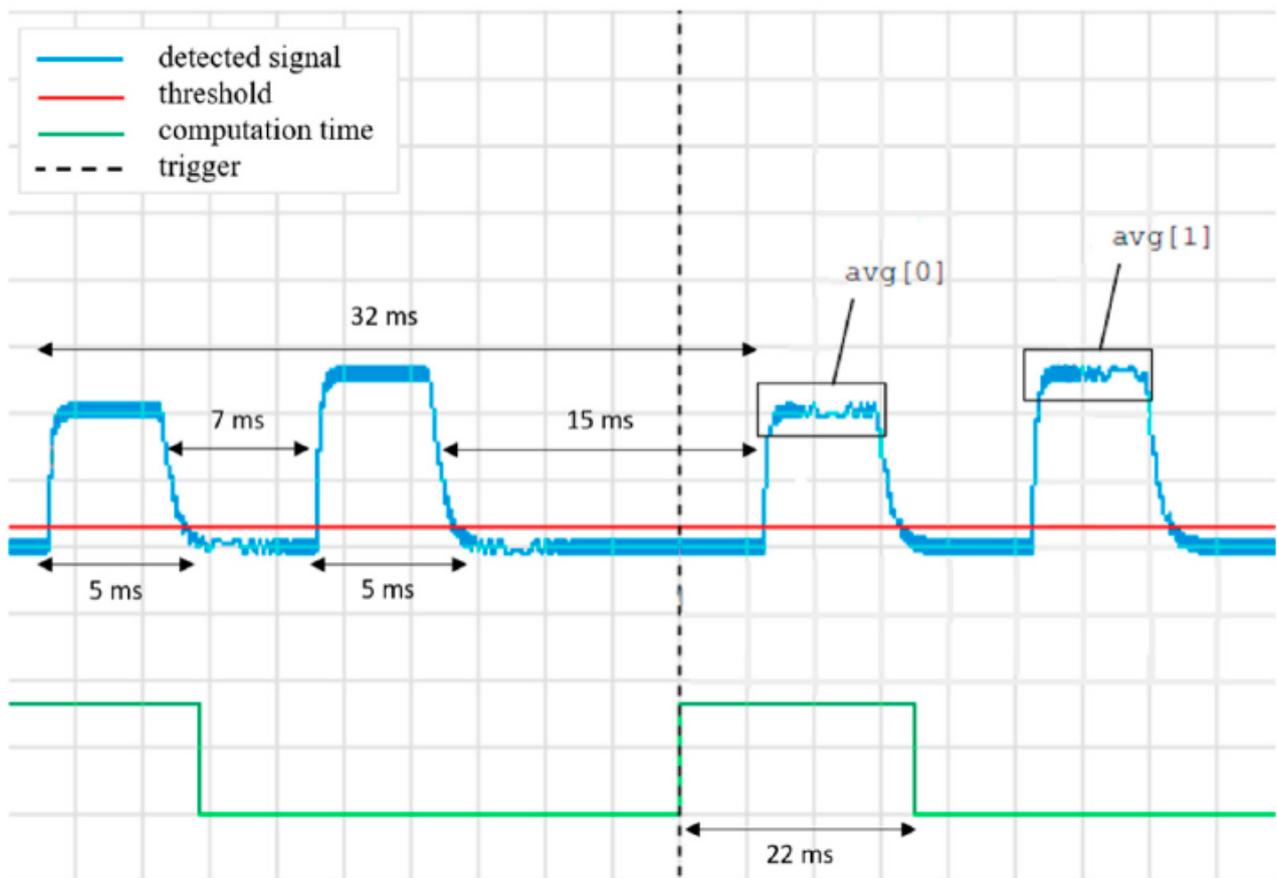


Figura 12: esempio di segnale ricevuto dal sensore, in ingresso al circuito.

Nella *figura 12*, come descritto dalla legenda in alto a sinistra, in azzurro è rappresentato il segnale rilevato dal sensore; in rosso la soglia di rumore sotto la quale non viene considerato alcun ingresso; in nero tratteggiato il trigger e in verde il tempo di elaborazione di un “pacchetto dati”.

L’ampiezza dei picchi è naturalmente calcolata per entrambi i fili, sarà poi proprio la differenza tra l’ampiezza di un filo e quella dell’altro a dare informazioni sulla posizione del corridore.

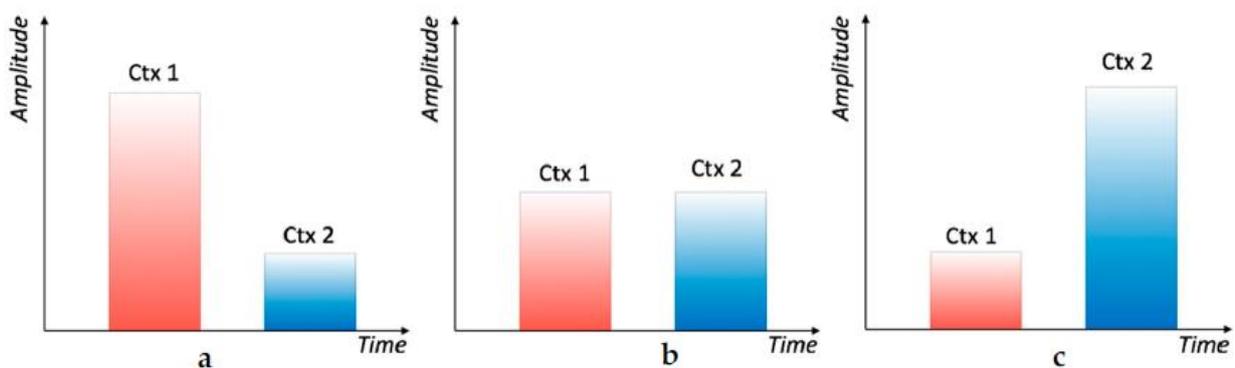


Figura 13: esempio di ampiezze del segnale in tre differenti casi: (a) corridore spostato verso il bordo sinistro, (b) corridore perfettamente al centro e (c) corridore spostato a destra.

Naturalmente il segnale che una bobina (sensore) genera se immersa in un campo magnetico (generato dai fili) è una tensione, che può essere calcolata con la seguente relazione.

$$V_0 = \left| \frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \right| = \frac{\omega \mu_0 I_0 N r^2}{2 \sqrt{x^2 + h_c^2}} \cos \theta \quad (14)$$

Dove la tensione  $V_0$  in uscita ai capi della bobina è calcolata come la derivata temporale del flusso del campo magnetico nel quale la bobina stessa è immersa. Naturalmente il flusso è a sua volta calcolato come l'integrale dell'induzione magnetica.

Ogni filo indurrà quindi una tensione proporzionale alla distanza del sensore da esso.

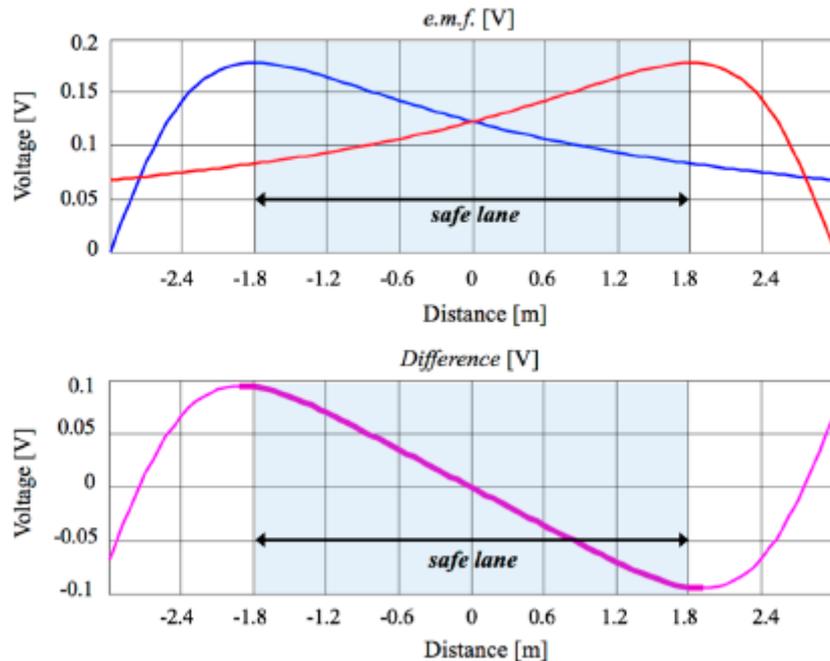


Figura 14: in alto l'andamento dei segnali rilevati dai due fili in funzione della distanza da essi, e sotto la differenza tra i due segnali

Assunti i due fili posti in  $x=0$  e  $x=3$  (metri), la figura 14 mostra in blu l'andamento del segnale rilevato rispetto alla distanza dal filo 1 (di sinistra) che genera il campo, mentre in rosso l'andamento del segnale rispetto al filo 2 di destra. Il segnale in viola rappresenta invece la differenza tra i due segnali di cui sopra, ed evidenzia che esiste un tratto lineare proprio in corrispondenza della zona centrale della corsia, ossia proprio nel range in cui il corridore deve muoversi per non rischiare di uscire fuori pista, la così detta "safe lane".

Nella figura 15 in basso, per una migliore comprensione, è rappresentato graficamente il posizionamento del sensore nello spazio.

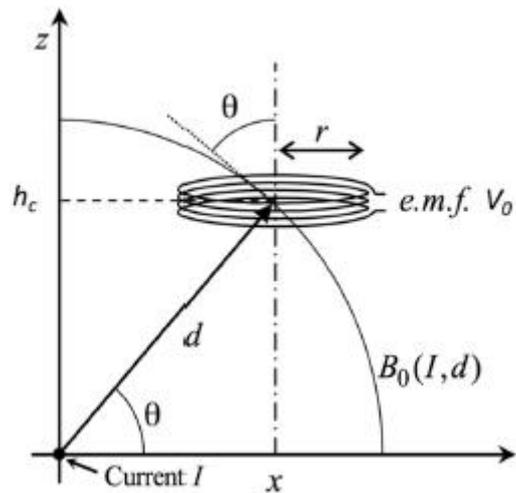


Figura 15: rappresentazione del sensore nello spazio.

Una volta che il microcontrollore ha ben interpretato i dati in ingresso, li trasformerà quindi in un segnale in tensione secondo la logica sopra spiegata, che, a seconda del valore andrà a pilotare i due bracciali vibranti collegati in uscita.

Tornando a focalizzare l'attenzione sul segnale in tensione e in particolare sulla sua parte lineare, è stato misurato che alla distanza di 2m circa da entrambi i fili ho un valore di picco di 120mV. Considerando che il ricevitore ha una precisione di 5-10mV, si può ipotizzare che si riesce a guidare l'utente con una precisione di circa 10-20 cm.

Le informazioni fornite all'utente tramite vibrazione vengono aggiornate ogni 32 ms, con un massimo ritardo di 64 ms nel caso peggiore in cui si verifica una brusca variazione di posizione. Considerando che l'atleta si muova ad una velocità di 5 m / s (cioè 18 km / h), la segnalazione arriva dopo che il soggetto ha percorso ancora al massimo una distanza di 30 cm rispetto a quando è stata rilevata l'anomalia.

Quando il valore assoluto della differenza era inferiore una certa soglia, non si è verificata alcuna vibrazione; tuttavia, questa soglia è programmabile ed è stata impostata in modo da non avere vibrazioni all'interno della zona centrale del tracciato. Man mano che questa differenza cresce, in positivo o in negativo, una modulazione di larghezza di impulso (PWM) crescente linearmente, guida il corrispondente motore a vibrazione posizionato sulle braccia dell'utente (Figura 16). In breve, il sensore di ricezione fornisce un feedback circa la posizione dell'utente all'interno della zona sicura delimitata dai due fili, avvisando l'utente quando si sta allontanando dalla zona centrale della pista e deve tornare verso il centro.



*Figura 16: fotografia scattata al soggetto non vedente, equipaggiato di tutta l'infrastruttura mobile, che si è offerto di effettuare un test pratico del sistema.*

Per quanto riguarda l'alimentazione del sensore mobile è stato utilizzato un pacco batterie da 2000 mA che nelle condizioni di lavoro più difficili, cioè quando almeno uno degli attuatori vibranti è sempre acceso per una continua segnalazione, dura più di sei ore, ed è più di quanto richiesto per una normale sessione di allenamento.

## **4. CAPITOLO 3**

### **Ottimizzazione del sensore già esistente**

In questa parte verranno discusse le problematiche del sistema riscontrate in fase di test, e verranno proposti dei miglioramenti al progetto. Verrà quindi descritto tutto il lavoro di ottimizzazione del sensore, fatto per aumentarne la sensibilità e la precisione.

#### **4.1 Problemi riscontrati nel progetto già esistente**

Il progetto descritto fin ora è stato realizzato e testato alcuni anni fa ed è un sistema interamente progettato e realizzato all'interno dell'ambiente universitario. Sono stati svolti anche numerosi test su pista per verificarne il corretto funzionamento e l'efficacia; è stato indossato da un'atleta non vedente che è stato in grado di appurarne la vera utilità per il suo uso ed evidenziare quali fossero le peculiarità.

Le problematiche evidenziate possono suddividersi in due categorie principali:

- Problematiche strutturali,
- Miglioramenti richiesti dal soggetto utilizzatore.

Partendo dalla seconda categoria di problematiche, che in realtà è una serie di consigli e dettagli progettuali, forniti dall'utilizzatore finale, che possono essere sistemati e rivisti per rendere il sistema il più comodo e funzionale possibile, spiccano due aspetti principali.

Il primo riguarda gli attuatori vibranti. Questi due motori vibranti sono posti sugli avambracci dell'atleta, legati con una fascia elastica. Hanno la funzione di avvertire l'atleta sulla sua posizione all'interno della corsia, aumentando progressivamente la vibrazione man mano che l'atleta si avvicina a uno dei bordi esterni; ad esempio se il corridore si avvicina al margine destro della corsia, l'attuatore posizionato sul suo braccio destro vibrerà sempre più intensamente, stessa cosa avviene per l'avvicinamento verso sinistra. I bracciali vibranti restano spenti se l'atleta si trova perfettamente al centro della sua area di corsa. Il tester ha evidenziato un disappunto proprio su questo ultimo aspetto, ha riferito di preferire una vibrazione lieve o intermittente, che si differisca da quelle di "pericolo" per spostamento dalla corsia, anche quando si sta correndo perfettamente

al centro, in modo da avere sempre e costantemente un feedback del corretto funzionamento del sistema.

Un'altra peculiarità evidenziata riguarda la sensibilità e la velocità di risposta del sistema. Sia chiaro, il progetto così com'è permette già di avere una risposta celere che non comprometta la corretta esecuzione della gara del soggetto, resta comunque il fatto che il lieve ritardo nel dare i segnali di avvisi vibro-tattili, dovuto al tempo di elaborazione dei dati, è stato percepito dal corridore, che ha suggerito di migliorare questo aspetto.

La correzione di questi due aspetti è fattibile e non comporta nessuna variazione massiccia del sistema, basta riprogrammare diversamente il circuito microcontrollore per dare segnali vibro-tattili differenti e più consoni, e si può agire sulle caratteristiche dei componenti circuitali per ottimizzare il tempo di risposta del sistema. In questo articolo non verranno trattate nel dettaglio le soluzioni appena commentate, ma verrà fatto un approfondimento sull'altra tipologia di problemi riscontrati.

Al primo dei due gruppi di problematiche troviamo le così dette strutturali, ossia piccoli errori in fase di progettazione, di cui non si è tenuto conto, che inducono il sistema a non funzionare nel migliore dei modi.

In questo caso il tester ha evidenziato che il sensore non dava nessun avviso di errore nel caso in cui l'atleta andasse a correre esattamente sopra il bordo della corsia, e quindi sopra uno dei due fili che delimitano la sua 'area sicura'. In questo caso l'errore è massimo e quindi gli attuatori vibranti avrebbero dovuto dare un segnale di massima intensità, ma questo non avviene.

Il problema sta nel fatto che come sensore si è utilizzata una bobina posta parallelamente al terreno. Quando la bobina si trova perfettamente sopra il filo che genera il campo, il vettore del campo risulta esattamente parallelo alla bobina e quindi è come se non fosse attraversata da nessun campo, quindi ai suoi capi non si genera nessuna differenza di potenziale, e quindi il circuito non rileva nessuna anomalia e non genera un segnale di errore.

A questo aspetto è stata trovata una soluzione, che consiste nell'aggiungere al sensore un'altra bobina posta verticalmente al terreno, in modo da compensare le mancanze dell'altra.

#### **4.2 Ottimizzazione e progetto del sensore**

Come è possibile vedere dalle *figure 17 e 18*, e confrontandole con le rispettive *figure 15 e 2*, sono state aggiunte due bobine verticali poste intorno alle spalle dell'atleta. Sono state utilizzate due bobine connesse in serie tra loro, una sulla spalla destra e una a sinistra per ovviare al problema del dove posizionare una sola unità. Resta il fatto che due loop connessi in serie costituiscono comunque una sola bobina unica, da ora in poi verrà quindi considerata come tale, a meno di differente precisazione.

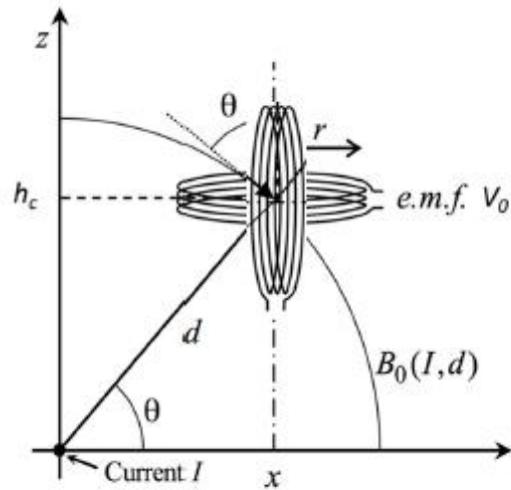


Figura 17: rappresentazione del sensore nello spazio con l'aggiunta delle spire verticali.

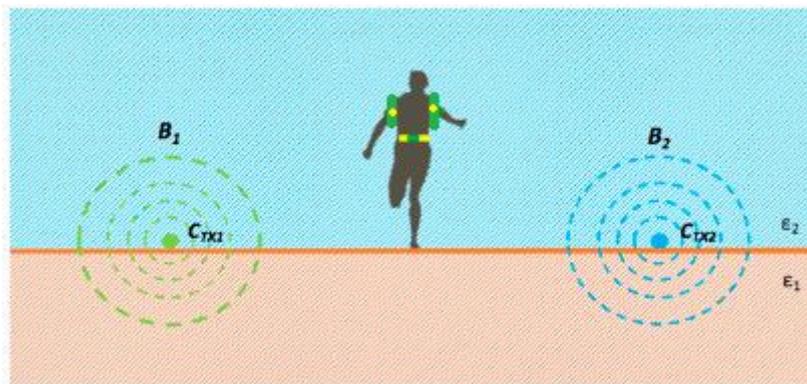
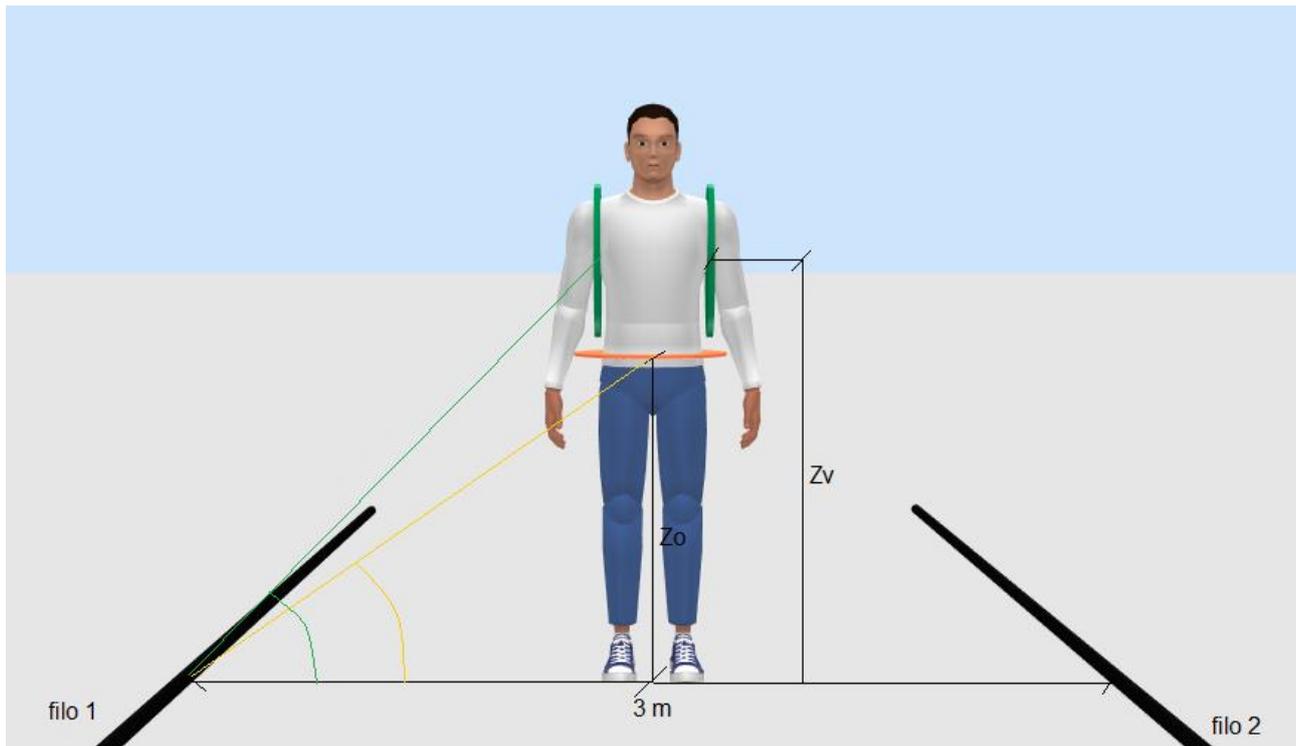


Figura 18: sezione trasversale della pista che mostra la posizione del corridore all'interno del corridoio sicuro generato dall'infrastruttura fissa. In questo caso il corridore indossa anche le bobine verticali.

Nella seguente figura 19 viene mostrato come sarà il nuovo sensore indossabile, ora composto da due bobine.



*Figura 19: Rappresentazione del sensore magnetico indossato.*

#### **4.2.1 valutazioni teoriche bobina aggiuntiva**

Come precedentemente anticipato, è stata aggiunta una bobina posizionata perpendicolarmente al terreno, per comodità e per una maggiore semplicità nell'indossarla, la bobina verticale è stata suddivisa in due parti uguali connesse in serie tra loro, una avvolta alla spalla destra e una a quella sinistra (*figura 19*).

Come lo era per il progetto precedente, anche in questo caso l'obiettivo è quello di ottenere un segnale totale in uscita dalle bobine il più lineare possibile, in modo da gestire correttamente la posizione del corridore attraverso gli attuatori vibro-tattili.

Con l'aggiunta di una bobina è necessario considerare l'andamento dei campi generati dai due fili rispetto ad entrambe le bobine, verticale e orizzontale originaria, come mostrato in *figura 20*.

In *figura 20(a)* è rappresentato lo schema dei campi generati dai due fili rispetto ad un punto P, in cui si trova la sola bobina orizzontale. In *figura 20(b)* è invece raffigurata la nuova schematizzazione con le tre bobine.

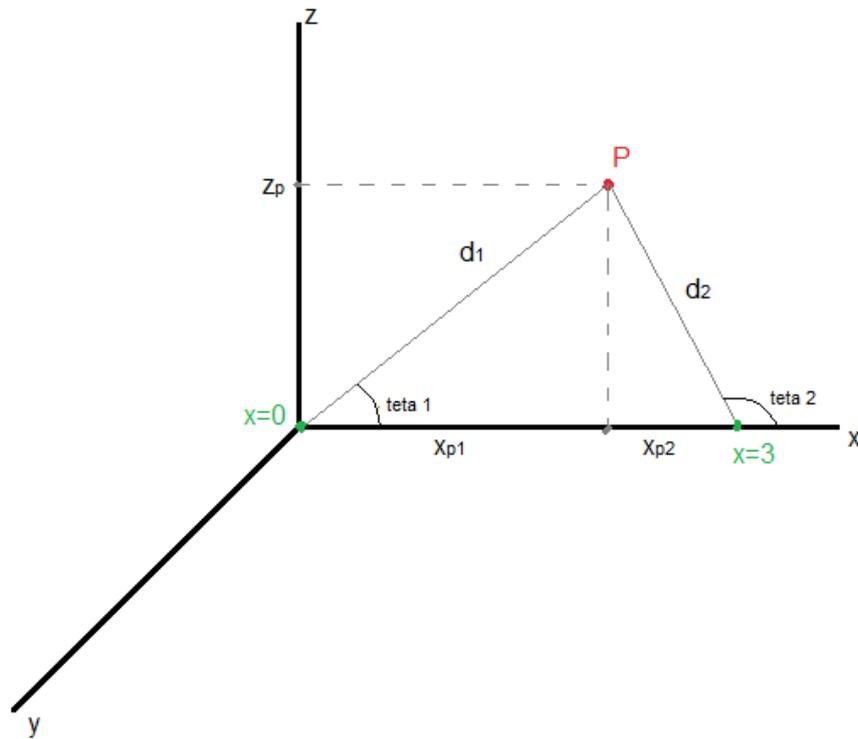


Figura 20(a): Campi generati dai fili rispetto ad un punto P.

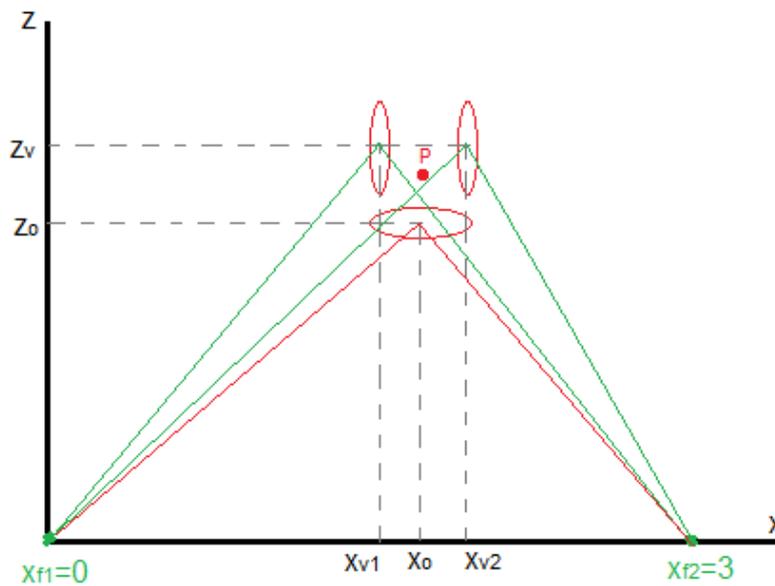


Figura 20(b): Schema configurazione sensore a tre bobine.

Da questa schematizzazione sono state ricavate le espressioni utili alla determinazione dei valori numerici dei campi magnetici generati dai fili a terra, in relazione alla posizione delle bobine che li captano.

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2 \pi d_1}; \quad (15)$$

campo relativo al filo 1 ad una distanza  $d_1$  da esso.

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2 \pi d_2}; \quad (16)$$

campo relativo al filo 2 ad una distanza  $d_2$  da esso.

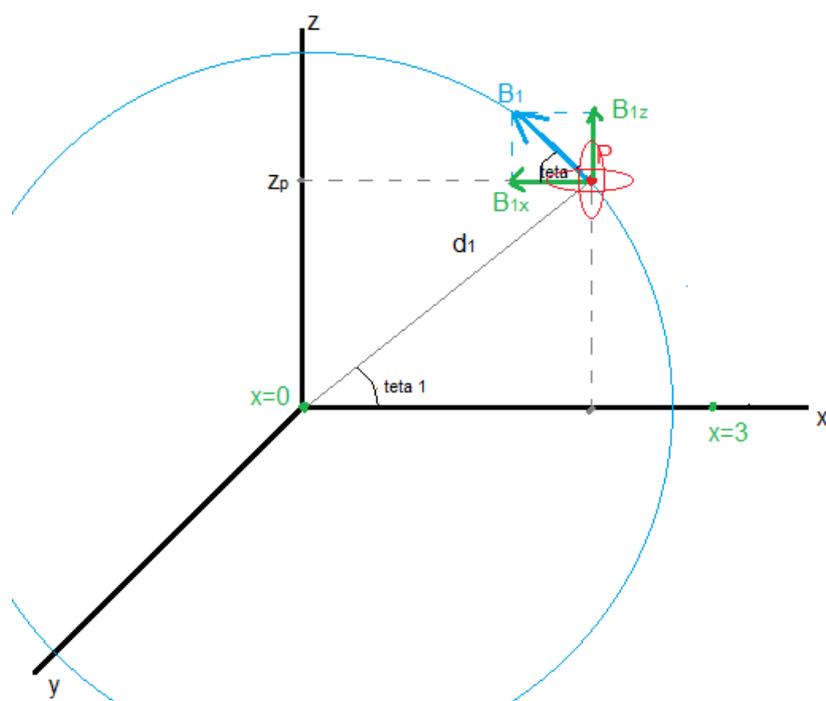
Con  $d_1$  e  $d_2$  distanze centro bobina-filo:

$$d_1 = \sqrt{(x_p - x_{f1})^2 + z_p^2}; \quad (17)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_p - x_{f2})^2 + z_p^2}; \quad (18)$$

Naturalmente, come visibile dagli schemi di *figura 21*, la bobina orizzontale verrà attraversata solamente dalla componente verticale del campo, ossia da  $B_{1z}$  e da  $B_{2z}$ , mentre le bobine verticali verranno attraversate dalle componenti orizzontali  $B_{1x}$  e  $B_{2x}$ .

È evidente che lungo la direzione  $y$ , così com'è stata scelta, il campo resta costante.



*Figura 21 (a): Campi captati dalla spira verticale.*

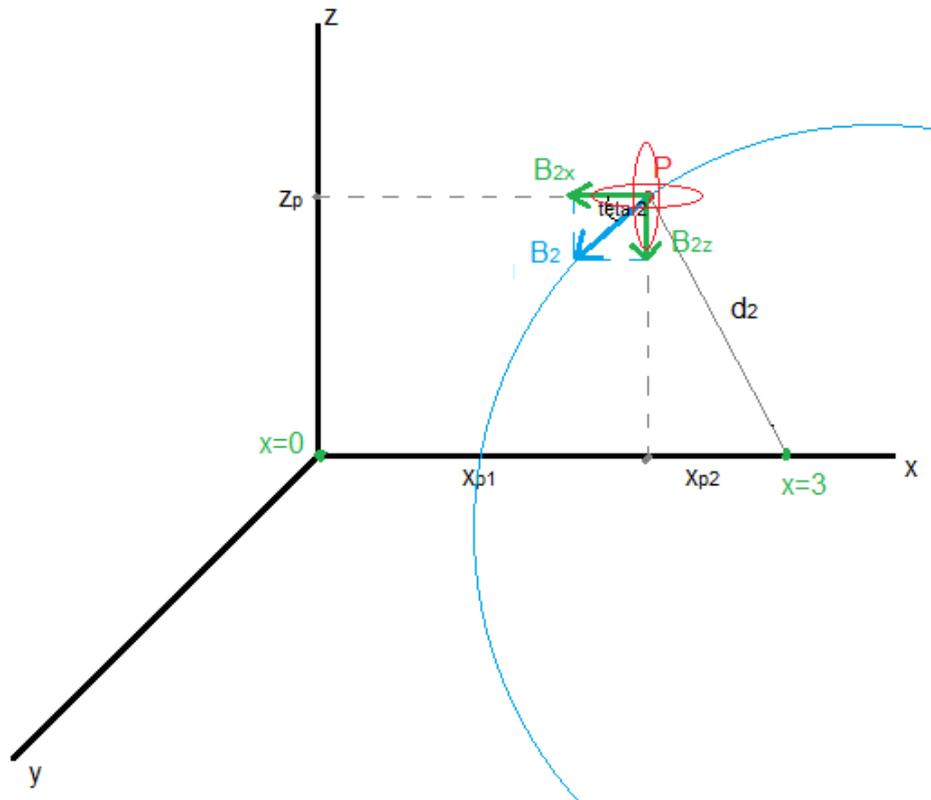


Figura 21 (b): Campi captati dalla spira orizzontale.

Di seguito le relazioni utili al calcolo di tutte le componenti dei campi.

$$B_{1z} = B_1 \cdot \sin(\vartheta_1); \quad (19)$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}((x_0 - x_{f1})/z_0); \quad (20)$$

$$B_{2z} = B_2 \cdot \sin(\vartheta_2); \quad (21)$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}((x_0 - x_{f2})/z_0); \quad (22)$$

con  $x_0$  e  $z_0$  coordinate sul piano x-z del punto P centrale della bobina orizzontale.

$$B_{1x} = B_1 \cdot \cos(\vartheta_1); \quad (23)$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}((x_v - x_{f1})/z_v); \quad (24)$$

$$B_{2x} = B_2 \cdot \cos(\vartheta_2); \quad (25)$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}((x_v - x_{f2})/z_v); \quad (26)$$

Volendo considerare inoltre che la bobina verticale è suddivisa in due parti, distanti da loro circa 40cm (larghezza media spalla-spalla), è possibile calcolare il campo per ognuna delle parti:  $B_{1x1}$  e  $B_{2x1}$  per la bobina di destra,  $B_{1x2}$  e  $B_{2x2}$  per quella di sinistra. Il ragionamento è lo stesso delle formule subito sopra [(19)-(26)], cambiando solamente la posizione  $xv$ , in  $xv1 = xv - 0,2m$  e  $xv2 = xv + 0,2m$ .

Per la bobina di destra:

$$B_{1x1} = B_1 \cdot \cos(\vartheta_1); \quad (27)$$

$$B_{2x1} = B_2 \cdot \cos(\vartheta_2); \quad (28)$$

con:

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}((xv1 - xf1)/zv); \quad (29)$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}((xv1 - xf2)/zv); \quad (30)$$

e per l'altra di sinistra:

$$B_{1x2} = B_1 \cdot \cos(\vartheta_1); \quad (31)$$

$$B_{2x2} = B_2 \cdot \cos(\vartheta_2); \quad (32)$$

con:

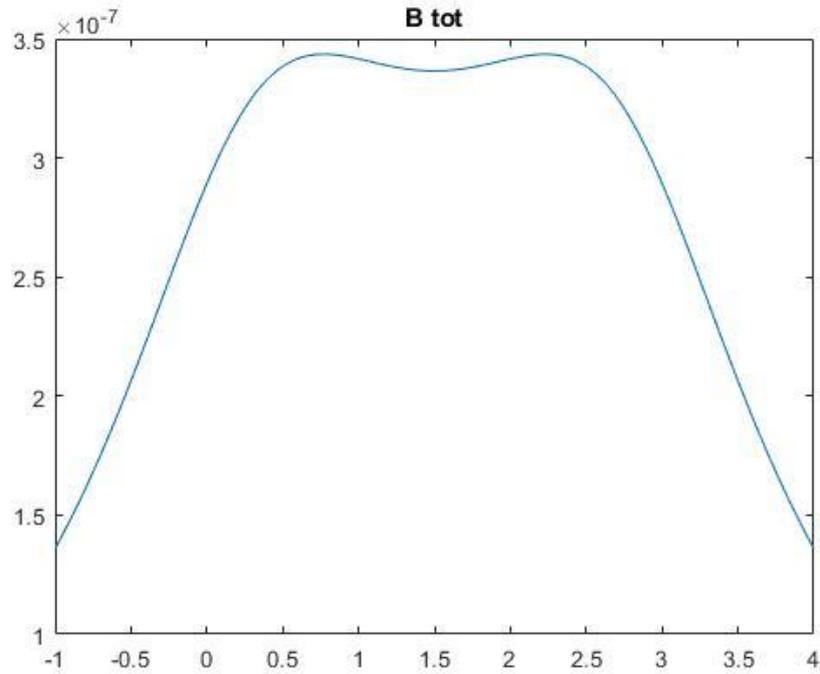
$$\vartheta_2 = \tan^{-1}((xv2 - xf1)/zv); \quad (33)$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}((xv2 - xf2)/zv); \quad (34)$$

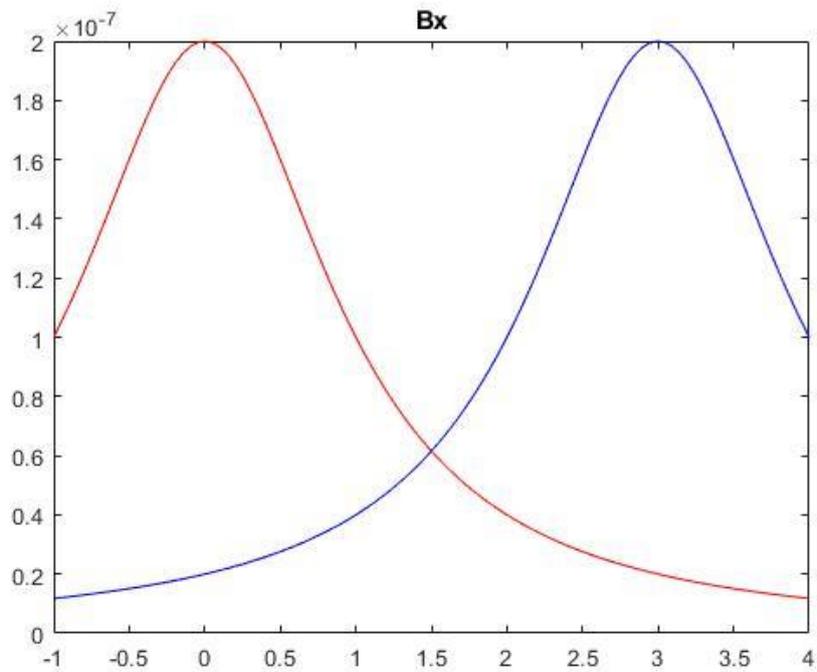
Queste espressioni sono state implementate in un software di calcolo per ricavarne un grafico in relazione alla posizione del corridore. (Listato del software riportato nella sezione 1) dell'appendice di questa tesi)

È stato deciso di posizionare i due fili sull'asse  $x$  nelle posizioni  $x=0$  e  $x=3$ , il corridore indossando i sensori dovrà muoversi in  $0 \leq x \leq 3$ . Per una maggiore completezza è stato considerato anche che il corridore potesse uscire dalla sua corsia e quindi vedere cosa sarebbe accaduto se l'atleta si muovesse sull'asse  $x$  tra  $-1 \leq x \leq 4$ , ossia uscendo al massimo di un metro a destra o a sinistra. Si è ottenuto un campo rilevato dal sensore dai valori riportati in *figura 22*.

Nelle figure successive, *figura 23* e *figura 24*, sono rappresentati i campi captati dal sensore orizzontale e verticale separatamente, mettendo insieme i campi di cui prima si ottiene il campo riportato in *figura 22*.



*Figura 22: andamento del campo totale dovuto alle due bobine,  $B_x+B_z$*



*Figura 23: andamento del campo relativo alla spira verticale al terreno, indicato con  $B_x$ .*

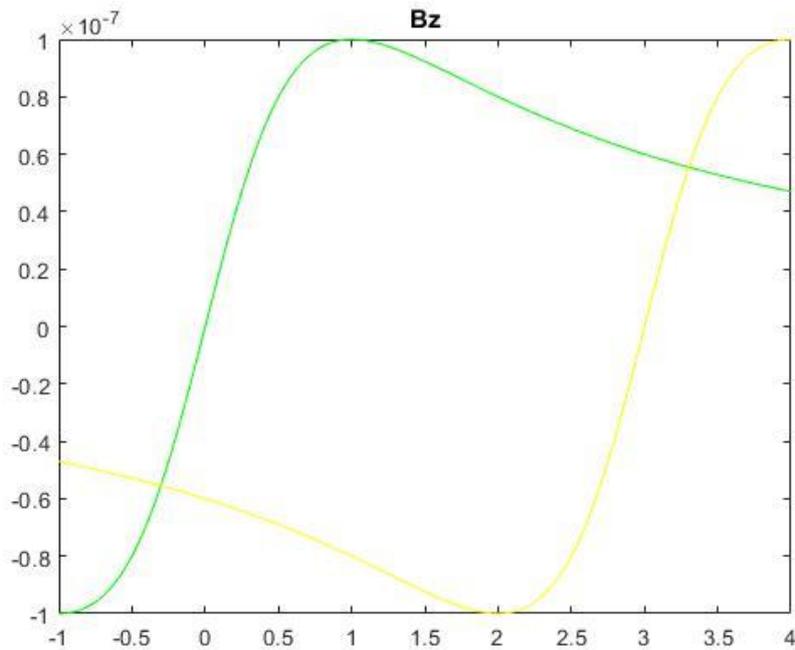


Figura 24: andamento del campo relativo alla spira orizzontale, indicato con Bz.

Una volta ricavati tutti i valori dei campi ai quali le bobine sono esposte, rispetto alla posizione del corridore, dovrò valutare le tensioni indotte nelle bobine in relazione ai suddetti campi. Saranno poi proprio i valori di tensione, con il loro andamento strettamente legato ai campi, che saranno utili alla determinazione della posizione del corridore.

#### 4.3 valutazione delle tensioni indotte

La valutazione delle tensioni generate dalle bobine che costituiscono il sensore indossabile è strettamente legata ai campi ai quali esse sono sottoposte.

Le tensioni seguono gli andamenti dei campi e sono determinate dalle seguenti relazioni:

$$V_{1x1} = B_{1x1} * (\omega * N_v * \pi * r_v^2); \quad (35)$$

$$V_{1x2} = B_{1x2} * (\omega * N_v * \pi * r_v^2); \quad (36)$$

$$V_{1z} = B_{1z(i)} * (\omega * N_o * \pi * r_o^2); \quad (37)$$

$$V_{2x1} = B_{2x1(i)} * (\omega * N_v * \pi * r_v^2); \quad (38)$$

$$V_{2x2} = B_{2x2(i)} * (\omega * N_v * \pi * r_v^2); \quad (39)$$

$$V_{2z} = B_{2z}(i) * (\omega * N_o * \pi * r_o^2); \quad (40)$$

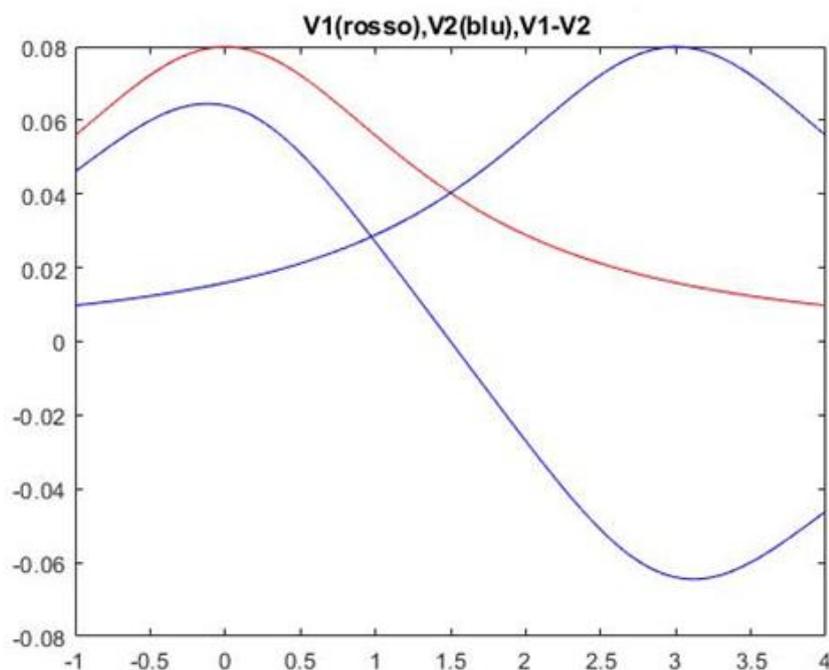
dove i nomi delle tensioni seguono quelli dei campi,  $r_o$  e  $r_v$  sono rispettivamente il raggio della bobina orizzontale e di quelle verticali, e  $N_o$  sono il numero di spire che compongono la bobina orizzontale e  $N_v$  quelle verticali.

Le tensioni generate vengono poi inviate ad un apposito circuito predisposto per l'elaborazione dei dati e viene così individuata la posizione del corridore nella corsia, proprio seguendo la logica descritta nel paragrafo 3.2.

Il circuito già esistente andava a sottrarre la tensione dovuta al campo del filo 2 a quella dovuta al campo del primo filo per la sola spira orizzontale. Si trovava quindi un andamento di tensione somigliante a quello mostrato in figura 14. Si dovrà ora modificare l'unità di elaborazione in modo da andare a trattare nello stesso modo anche le tensioni provenienti dalle spire verticali.

In maniera più semplice si potrà valutare come  $V_1$  la somma di tutte le tensioni generate dalle tre spire a causa del campo irradiato dal filo 1, rispettivamente chiameremo  $V_2$  la somma delle tensioni relative al secondo filo. Si andrà poi a sottrarre  $V_2$  a  $V_1$  e si otterrà un andamento con un tratto lineare, utile a individuare la posizione del corridore all'interno della corsia. Se il corridore si trova perfettamente al centro la tensione sarà nulla. Aumenterà o diminuirà se l'atleta si sposta verso destra o verso sinistra.

In *Figura 25* è rappresentato l'andamento delle suddette tensioni ricavate da una simulazione teorica.



*Figura 25: andamento delle tensioni  $V_1$ ,  $V_2$  e della loro differenza.*

#### 4.4 confronto modelli geometrici per le spire

Fin ora, come sensori indossabili, sono stati sempre considerati degli avvolgimenti rotondi per semplicità di calcolo, ma in realtà le bobine più significative, ossia quelle avvolte intorno al braccio all'altezza della spalla, non saranno perfettamente rotonde, ma per lo più ovali, stessa cosa vale per l'avvolgimento all'altezza della vita, anche se meno significativo.

La domanda che ci si è posti è su cosa cambierebbe se si considerassero le bobine ovali piuttosto che rotonde? Sicuramente si avranno dei valori di tensione generati differenti, ma di quanto?

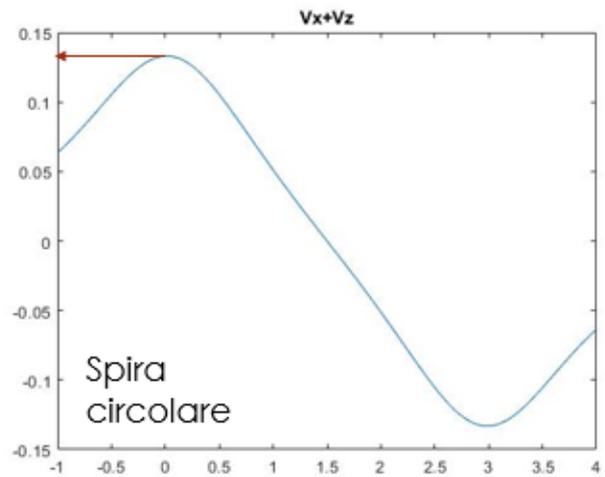
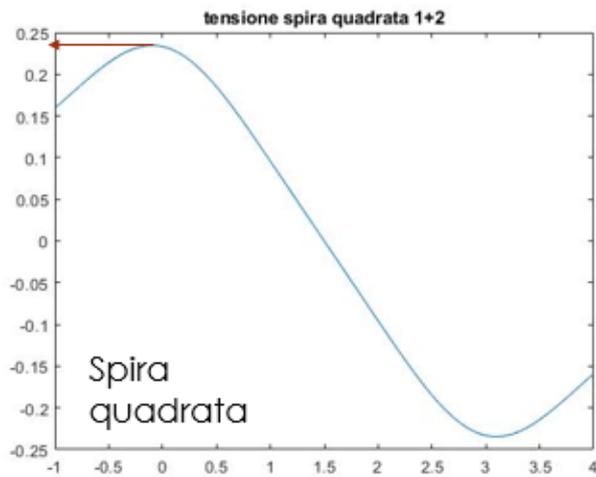
Per rispondere a queste domande è stata fatta la stessa trattazione delle bobine rotonde, considerandole ora come quadrate o rettangolari, in modo che la vera bobina ovale avrà un comportamento in media tra quella tonda e quella quadrata.

Per lo studio della bobina come quadrata è stato calcolato (tramite un programma matlab riportato al punto 2) dell'appendice conclusiva) l'integrale di superficie della bobina, ottenendo così il flusso che attraversa la superficie rettangolare della bobina stessa ed è poi stato possibile ricavare la tensione generata, sempre in relazione alla posizione dell'atleta sulla corsia.

È stata fatta un'integrazione per quadrati, ossia è stata divisa la superficie rettangolare in esame in tanti piccoli quadrati, ed è stato calcolato il flusso che attraversa la singola porzione. Per ottenere poi il flusso totale sono stati sommati tutti i flussi di ogni sotto-porzione e si è ottenuto il valore finale.

Tramite le funzionalità del programma in matlab, sono stati quindi ricavati i grafici dell'andamento della tensione generata dalla spira in relazione alla posizione del corridore. Confrontando il grafico relativo alle spire tonde con quest'ultimo caso si può dire che la differenza è minima e quindi il valore di tensione reale che si avrà con le spire più o meno ovali sarà poco differente da quello ricavato considerando per semplicità gli avvolgimenti come tondi.

Di seguito verranno mostrati i grafici evidenziandone le differenze.



In definitiva, osservando i grafici si deduce che, come già detto, il grafico di una spira ovale, quindi di forma reale, è un compromesso tra quello di una spira circolare e quello di una spira quadrata.

Considerando la spira come quadrata si sono ottenuti dei valori teorici di tensione leggermente più alti di quelli che si avevano considerando spire circolari (circa 0.15V in più), ma la curva risultante dalla somma dei campi ha sempre lo stesso andamento con un tratto lineare.

## 5. CAPITOLO 4

### Valutazione elettromagnetica

Nella seguente sezione si discuterà della sicurezza del sensore per l'uomo dal punto di vista elettromagnetico e verranno poi suggeriti alcuni accorgimenti per poter aumentare l'efficienza del sensore senza però andare a discriminare i parametri di sicurezza.

#### 5.1 Misure relative alla sicurezza per l'uomo

Un aspetto fondamentale e non trascurabile della progettazione del sensore indossabile e non è quello della sicurezza elettromagnetica per l'utilizzatore e per chi si trova nelle sue vicinanze.

Il sensore indossabile non necessita di particolari accorgimenti in quanto è atto a captare un campo e non a generarne uno lui stesso, nonostante ciò, va comunque a lavorare a livelli di tensione molto bassi e quindi non pericolosi.

Per quanto riguarda l'infrastruttura fissa, ossia i fili stesi a terra atti a generare il campo per delimitare la 'safe line' entro la quale il corridore si deve attenere, occorre fare le dovute valutazioni per far sì che i livelli di campo prodotti rispettino i requisiti di sicurezza a norma di legge.

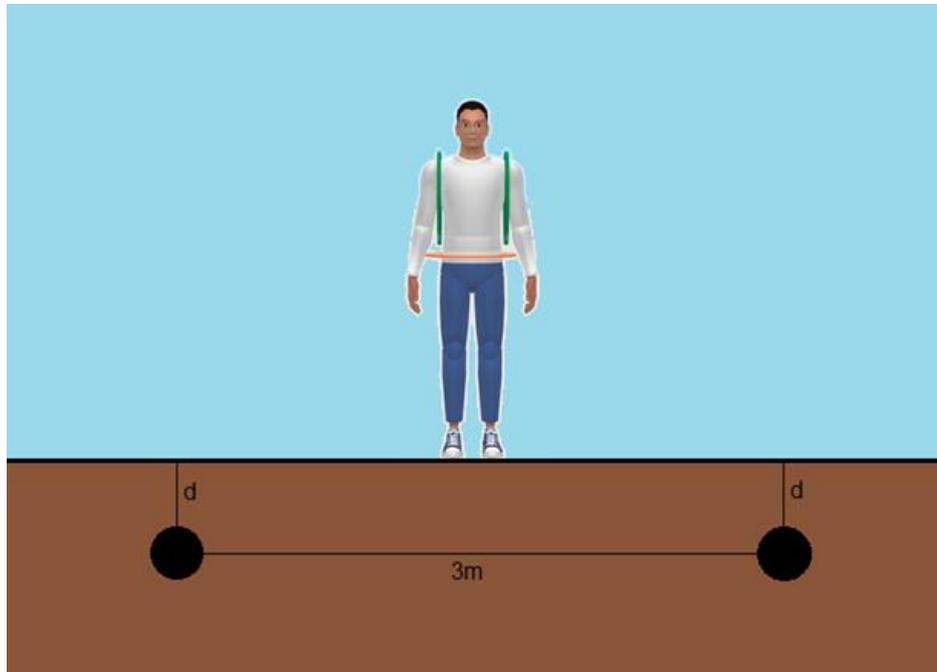
La legge italiana prevede due tipologie di limiti per i livelli di campo; il primo è un valore di attenzione, che rappresenta il livello sotto il quale i campi devono attenersi nel caso di esposizione non professionale, il secondo è un valore limite, ossia un livello di campo da non oltrepassare nel caso di esposizione professionale.

I valori a norma di legge sono:

- Valore di attenzione: 0.2 A/m;
- Valore limite. 0.016 A/m

Nel caso in esame, l'atleta deve essere sottoposto a un valore di campo inferiore al valore limite in quanto è considerato un soggetto che resterà immerso nel campo magnetico per un tempo più o meno lungo, ma avrà comunque un'esposizione prolungata (esposizione professionale).

Quella mostrata in *figura 26* è la configurazione da prendere in esame per il calcolo della sicurezza elettromagnetica. Rappresenta infatti il corridore posizionato all'interno della 'safe line' e il posizionamento dei fili rispetto al terreno.



*Figura 26:* configurazione dell'infrastruttura fissa al suolo.

Verranno considerati tre diverse configurazioni, due con i cavi interrati rispettivamente di 10 e 15 cm e una con i cavi appoggiate e stesi sul terreno.

Si utilizzerà il procedimento inverso dato che si è ancora in fase di progetto; anzi che calcolare il campo generato da una corrente prefissata, si andrà a vedere la corrente massima utilizzabile nei fili in corrispondenza dei limiti di legge.

Si utilizzerà la seguente relazione:

$$I_{\max} = 2\pi \cdot d \cdot H_{\max} \quad (41)$$

Dove  $H_{\max}$  è appunto il valore limite e  $d$  è la distanza del filo dal terreno.

Inoltre c'è da sottolineare che la corrente che va ad attraversare i fili ha un andamento impulsato, e quindi ha un suo duty-cycle, che nel nostro caso è di 5/32. Nel caso di onde quadre il valore del campo massimo deve essere scalato del duty-cycle dell'onda, si avrà quindi:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 \cdot H_{\max}}{d \text{ duty-cycle}} \quad (42)$$

$$H_{\max} = \frac{B_{\max}}{\mu_0} \cdot \text{duty-cycle} = H_{\max \text{ normativa}} \cdot \text{duty-cycle} \quad (43)$$

$$I_{\max} = 2\pi \cdot d \cdot H_{\max \text{ normativa}} \cdot \text{duty-cycle} \quad (44)$$

Nella tabella sottostante vengono riepilogati tutti i valori di corrente massimi utilizzabili nei vari casi.

	<b>d=1cm (al suolo)</b>	<b>d=10cm</b>	<b>d=15cm</b>
<b>Valore di attenzione di 0.2 A/m</b>	<u><math>I_{\max}=0,08\text{A}</math></u>	<u><math>I_{\max}=0,8\text{A}</math></u>	<u><math>I_{\max}=1,2\text{A}</math></u>
<b>Utilizzando invece il valore limite di 0,016A/m</b>	<u><math>I_{\max}=6,4\text{mA}</math></u>	<u><math>I_{\max}=64\text{mA}</math></u>	<u><math>I_{\max}=96\text{mA}</math></u>

Tabella 5: tabella riassuntiva dei valori di corrente massimi utilizzabili.

È importante inoltre sottolineare che dati i valori di campo così bassi, l'influenza che un filo potrebbe avere sull'altro è praticamente trascurabile, il che rende possibile il calcolo delle correnti massime nel modo sopra descritto.

Naturalmente si nota che interrando il filo nel suolo del circuito della pista si riescono ad ottenere dei valori di corrente piuttosto elevati. Nel caso invece di fili appoggiati al terreno si riuscirebbe a creare un percorso più semplice da costruire e modificabile, avendo sempre dei valori di corrente ammissibili buoni e utilizzabili senza problemi.

## 6.CONCLUSIONI

In conclusione a questa tesi, nella quale si è descritto tutto il funzionamento e tutti gli accorgimenti utili per la progettazione e la realizzazione sia della parte fissa che di quella mobile indossabile, si vuole porre l'attenzione su un dettaglio che si è sempre sottovalutato in tutta la trattazione precedente. È importante precisare che si è partiti da un modello di infrastruttura fissa e mobile già esistenti e testati e si è cercato di migliorarli, ma solo dal punto di vista teorico, resta quindi ancora l'incognita della fisica realizzazione di questo nuovo aggiornamento del progetto.

Intanto dallo studio del sensore esistente e, mettendolo a confronto con il nuovo modello pensato, si può notare che il sensore indossabile potrebbe essere composto anche solamente dalle bobine verticali senza inserire quella orizzontale, che è però indispensabile e obbligata in quanto serve, e si crea involontariamente, quando si vanno a collegare insieme le spire verticali poste separate alle due spalle.

È quindi consigliabile lavorare sul numero di avvolgimenti in verticale per ottenere dei livelli di tensione idonei ad essere processati e a far funzionare i sensori vibro-tattili. Come spira verticale verrà lasciato quel solo avvolgimento che serve da collegamento, come spiegato sopra.

### 6.1 appendice

Per tutta la progettazione del nuovo sensore ottimizzato è stato implementato un programma nell'ambiente matlab. Questo ha permesso di sviluppare i calcoli in maniera veloce e più precisa, e di effettuare facilmente numerosi confronti variando alcuni parametri, in modo da riuscire a scegliere quali fossero i più consoni per il corretto funzionamento del progetto.

Di seguito verranno quindi riportati i listati dei programmi, il main program e le funzioni ausiliarie utilizzate in fase di sviluppo.

## 1) PARTE 1

```
% PROGRAMMA PRINCIPALE

close all;

clear all;

xf1=0 ; %posizione filo 1
xf2=3 ; %posizione filo 2
zv=1.4 ; %altezza in m della spira verticale sempre costante
zo=1.1;  %altezza in m della spira orizzontale sempre costante
I=0.8;
f=100000; %frequenza I
Nv=20; %numero spire bobine verticale
No=1; %numero spire bobine orizzontale
rv=0.1; %raggio spire verticali
ro=0.2; %raggio spira orizzontale

%calcolo componenti cartesiane B

%componenti orizzontali

for i = 1:100

    x=linspace(-1,4,100);

    xo = x(i);

    teta1(i) = atan((xo-xf1)/zo);

    teta2(i) = atan((xo-xf2)/zo);

    xp=xo;
    zp=zo+0.15;

    [B1o(i),B2o(i)] = calcoloB(xp,xf1,xf2,zp,I);

    B1z(i)=B1o(i)*sin(teta1(i));

    B2z(i)=B2o(i)*sin(teta2(i));

end

%calcolo componenti verticali spira 1 (sinistra)

for i = 1:100

    x=linspace(-1,4,100);

    xv1 = x(i)-0.2; %spira sx spostata 10cm a sx rispetto xo

    teta1(i) = atan((xv1-xf1)/zv);

    teta2(i) = atan((xv1-xf2)/zv);
```

```

xp=xv1;
zp=zv+0.15;

[B1v1(i),B2v1(i)] = calcoloB(xp,xf1,xf2,zp,I);

    B1x1(i)=B1v1(i)*cos(teta1(i));
    B2x1(i)=B2v1(i)*cos(teta2(i));

end

%calcolo componenti verticali spira 2 (destra)
for i = 1:100

    x=linspace(-1,4,100);

    xv2 = x(i)+0.2; %spira dx spostata 10cm a dx rispetto xo

    teta1(i) = atan((xv2-xf1)/zv);
    teta2(i) = atan((xv2-xf2)/zv);

    xp=xv2;
    zp=zv+0.15;

    [B1v2(i),B2v2(i)] = calcoloB(xp,xf1,xf2,zp,I);

    B1x2(i)=B1v2(i)*cos(teta1(i));
    B2x2(i)=B2v2(i)*cos(teta2(i));

end

%calcolo tensioni

w = 6.28*f;

for i=1:100

    V1x1(i) = B1x1(i)*(w*Nv*3.14*rv^2);
    V1x2(i) = B1x2(i)*(w*Nv*3.14*rv^2);
    V1z(i) = B1z(i)*(w*No*3.14*ro^2);
    V2x1(i) = B2x1(i)*(w*Nv*3.14*rv^2);
    V2x2(i) = B2x2(i)*(w*Nv*3.14*rv^2);
    V2z(i) = B2z(i)*(w*No*3.14*ro^2);

```

```

end

%grafici

plot(x,B1x1,'r');

hold on
plot(x,B2x1,'b');

title('B spira vert 1')

figure;

plot(x,B1x2,'r');

hold on
plot(x,B2x2,'b');

title('B spira vert 2')

figure;

plot(x,B1z,'g');

hold on

plot(x,B2z,'y');

title('B spira orizz')

figure;
plot(x,B1z-B2z+B1x1+B2x2+B1x2+B2x1);
title('B tot')

figure;
plot(x,V1x1+V1x2,'r');

hold on
plot(x,V2x1+V2x2,'b');

plot(x,(V1x1+V1x2)-(V2x1+V2x2),'b'); %differenza tra la somma delle tensioni delle
due spire dx esx relative a ogni filo
title('V1(rosso),V2(blu),V1-V2 verticale')

figure;
plot(x,(V1x1+V1x2)-(V2x1+V2x2)+(V1z+V2z));
title('Vx+Vz')
figure;
plot(x,(V1x1+V1x2)+V1z);

```

```

title('somma tensioni 3spire relative filo 1')

figure;
plot(x,V1z+V2z,'b');

disp('end')

% PROGRAMMA CALCOLO B

function [B1,B2] = calcoloB(xp,xf1,xf2,zp,I)

m0=12.56*10^-7;

d1 = sqrt((xp-xf1)^2 + zp^2); %distanza centro spira - filo1
d2 = sqrt((xp-xf2)^2 + zp^2); %distanza centro spira - filo2

B1 = (m0*I) / (6.28*d1);
B2 = (m0*I) / (6.28*d2);

end

```

## 2) PARTE 2

```

%PROGRAMMA CON SPIRE QUADRATE

close all;

clear all;

xf1=0 ; %posizione filo 1
xf2=3 ; %posizione filo 2
zv=1.4 ; %altezza in m della spira verticale sempre costante
zo=1.1; %altezza in m della spira orizzontale sempre costante
I=0.8;
f=100000; %frequenza I
Nv=20; %numero spire bobine verticale
No=1; %numero spire bobine orizzontale
rv=0.1; %raggio spire verticali
ro=0.2; %raggio spira orizzontale

Lv=0.2; %larghezza spira verticale
Hv=0.5 %altezza spira verticale

w = 6.28*f;

%estremi integrazione
ya=0;
yb=Lv;
za=zv- (Hv/2);
zb=zv+ (Hv/2);

%spira destra

```

```

for i = 1:100

x=linspace(-1,4,100);

xv2 = x(i)+0.2; %spira dx spostata 10cm a dx rispetto xo

Ftot2(i)=0;

for nz = 1:10

    h=linspace(za,zb,10);

    zv=h(nz);

    A=((zb-za)/10)*Lv;

teta1(nz) = atan((xv2-xf1)/zv);

teta2(nz) = atan((xv2-xf2)/zv);

xp=xv2;
zp=zv;

[B1v2(nz),B2v2(nz)] = calcoloB(xp,xf1,xf2,zp,I);

    B1x2(nz)=B1v2(nz)*cos(teta1(nz));

    B2x2(nz)=B2v2(nz)*cos(teta2(nz));

    Ftot2(i)=Ftot2(i)+(B1x2(nz)- B2x2(nz))*A;

    fem2(i)=Ftot2(i)*w*Nv;
end

end

%spira sinistra
for i = 1:100

x=linspace(-1,4,100);

xv1 = x(i)-0.2; %spira dx spostata 10cm a dx rispetto xo

Ftot1(i)=0;

for nz = 1:10

    h=linspace(za,zb,10);

    zv=h(nz);

    A=((zb-za)/10)*Lv;

teta1(nz) = atan((xv1-xf1)/zv);

teta2(nz) = atan((xv1-xf2)/zv);

```

```

xp=xv1;
zp=zv;

[B1v1(nz),B2v1(nz)] = calcoloB(xp,xf1,xf2,zp,I);

B1x1(nz)=B1v1(nz)*cos(teta1(nz));
B2x1(nz)=B2v1(nz)*cos(teta2(nz));
Ftot1(i)=Ftot1(i)+(B1x1(nz)- B2x1(nz))*A;
fem1(i)=Ftot1(i)*w*Nv;
end

end

plot(x,Ftot1);
title('Ftot1')
figure;
plot(x,fem1);
title('tensione spira 1')

figure
plot(x,Ftot2);
title('Ftot2')
figure;
plot(x,fem2);
title('tensione spira 2')

figure;
plot(x,fem1+fem2);
title('tensione spira quadrata 1+2')
disp('end')

```