

Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Insegnamento: Geometria e Algebra L-A

**REALIZZAZIONE DI UN
TRASDUTTORE TATTILE DEL
COLORE IN FORMATO IHS**

Tesi di Laurea di

Marcello Di Vincenzo

Relatore :

Prof. **Massimo Ferri**

Correlatori:

Dott. Ing. **Ludovico Ausiello**

Dott. Ing. **Gabriele Canini**

Sessione III

Anno Accademico 2004-2005

Ringraziamenti

Indice

Introduzione	1
1 Premesse	3
1.1 Rassegna degli ausili e delle protesi gi'a esistenti	3
2 La stimolazione elettrotattile	5
2.1 Risposta tattile della mano	5
2.2 Stimolazione meccanica	10
2.3 Elettrochimica dell'interfaccia elettrodo-pelle	13
2.4 Soglia di sensibilità e del dolore	15
2.4.1 Meccanismi legati alla soglia del dolore	16
3 Organizzazione teorica	19
3.1 Fondamenti fisiologici della visione	19
3.2 Il colore in formato IHS	21
3.3 Soluzione	24
4 HARDWARE	27
4.1 Schema generale	27
4.2 Stadio di enable	30
4.3 Oscillatore	31
4.3.1 Fase di carica	34
4.3.2 Fase di scarica	34
4.3.3 Dimensionamenti e duty cyle	36
4.3.4 Scelta dei valori di capacità e resistenze	38
4.4 Stadio di ingresso	39

4.5	Driver	42
4.5.1	Buffer	42
4.5.2	Stadio amplificatore di uscita	43
4.5.3	Calcolo dei valori delle correnti	44
4.6	Schema completo	45
4.7	Realizzazione PCboard	46
	Conclusioni	49

Elenco delle figure

2.1	Sezione dell'epidermide e degli strati sottostanti, nella quale si possono osservare diversi organi recettori per le sensazioni cutanee.	7
2.2	Le diverse concentrazioni di alcuni recettori della pelle	8
2.3	Schema delle componenti fondamentali che influenzano la risposta temporale di un meccanorecettore.	10
2.4	Risposta frequenziale della funzione di trasferimento tra la pressione applicata alla pelle e la pressione sul recettore	11
2.5	La densità di corrente sulla superficie di un conduttore dal volume omogeneo è funzione della distanza dal centro di un elettrodo circolare di stimolazione	13
2.6	Tensione avvertita su 12 mm^2 di pelle stimolata da un elettrodo coassiale con un impulso di corrente di $10 \mu\text{s}$. (a) regione di carica; (b) regione resistiva; (c) regione di scarica.	14
2.7	Soglia di stimolazione elettrotattile, (a) corrente e (b) carica funzioni della durata dell'impulso	16
3.1	Sezione ingrandita dell'orbita oculare	20
3.2	Modello di colore HSV	21
3.3	Ruota dei colori contenente anche i colori non spettrali (porpore). I numeri rappresentano la frequenza in nanometri della luce	22
3.4	Cambiamenti del colore, variando un parametro e mantenendo costante gli altri due.	23

3.5	Influenza della luminosità e della saturazione sulla percezione di un colore	24
3.6	Posizionamento dei sei attuatori sul palmo della mano	26
4.1	Schema a blocchi del circuito	27
4.2	Forme d'onda relative al primo e al secondo blocco e all'uscita stessa del timer 556 con frequenza 1 Hz	28
4.3	Stadio di enable	30
4.4	Piedinatura del timer 556	31
4.5	Schema logico equivalente del timer 556	32
4.6	Schema del circuito monostabile realizzato con il primo blocco del timer 556	33
4.7	forme d'onda relativa al processo di carica e scarica del condensatore	35
4.8	And logico - stadio d'ingresso	39
4.9	Forme d'onda relative alla modulazione in ampiezza operata dall'and sul segnale esterno	40
4.10	Stadio separatore ad elevata impedenza d'ingresso	42
4.11	Stadio amplificatore d'uscita	43
4.12	Schema completo del circuito elettronico	45
4.13	layout del top layer del pcb	46

Elenco delle tabelle

2.1	Capacità di discriminare due punti di stimolazione diversi(mm)	6
2.2	Numero di livelli discriminabili in risposta alla stimolazione elettrotattile e vibrotattile	6

6pt

Introduzione

E' realmente possibile pensare di compensare le disabilità con la tecnologia? Una risposta accettabile non può provenire solo dall'ingegneria intesa come aumentata potenza di calcolo o miniaturizzazione, bensì da un atteggiamento progettuale attento al fattore umano del problema. Il progetto di un ausilio elettronico per non vedenti, per esempio, dovrà tener conto di aspetti quali invasività (fisica o sensoriale), portabilità, istintività d'uso, tempi di apprendimento. In questa direzione si è mosso il progetto per la realizzazione di un trasduttore tattile del colore che era associato al progetto VIDET. Il soggetto potrà usufruire di un dispositivo in grado di trasformare le informazioni relative ai colori in vibrazioni meccaniche. Potrà così avere un modello cromatico dell'ambiente circostante, che esplorerà con un mouse.

Con questa tesi vorremmo colmare una lacuna di VIDET: tempi di memorizzazione lunghi dovuti alla sua limitata istintività d'uso. Si è così preferito lavorare questa volta con il segnale IHS, più immediato rispetto all'RGB, e applicare gli attuatori sul palmo della mano anziché sulle falangi delle dita. Il lavoro di tesi si è esteso dalla scelta fra diverse alternative alla progettazione e realizzazione dell'hardware.

Dopo una premessa sugli ausili e le protesi già esistenti, nel secondo capitolo si analizza la stimolazione elettrotattile della pelle con particolare attenzione alle soglie di sensibilità e di dolore, indispensabili per scegliere i parametri degli impulsi meccanici. Segue una valutazione delle soluzioni che si sono presentate inizialmente, alla luce della natura del segnale IHS, motivando così le scelte progettuali del trasduttore stesso. Infine il capitolo 4 descrive in dettaglio il progetto della scheda impiegata nelle

trasduzione stessa del segnale.

Capitolo 1

Premesse

1.1 Rassegna degli ausili e delle protesi gi' a esistenti

L'apparato visivo è fra gli apparati di senso, quello che convoglia più informazione sull'ambiente circostante: la vista di un oggetto permette di valutarne la posizione nello spazio con sufficiente accuratezza anche se è a distanza notevole, ed anche se non produce esso stesso luce.

In questi aspetti differisce sostanzialmente dall'apparato tattile, che agisce a breve distanza e da quello uditivo, che consente una utile individuazione quasi solo di oggetti che producono suoni. Perciò una lesione grave dell'apparato visivo ha come principale conseguenza una drammatica riduzione della capacità del soggetto di conoscere l'ambiente circostante e quindi di interagire con esso.

La soluzione più significativa al problema della lettura per non vedenti è costituita dall'Optacon, che comprende: a) una testina di lettura che deve scorrere sul testo da leggere, nel quale è collocato un insieme di fotodiodi posti secondo una matrice di 6 colonne e 24 righe pari a 144 fotodiodi; b) un pannello di punti vibranti sul quale appoggia il pollice del cieco; collegando ogni punto con un fotodiodo, si ottiene il carattere in rilievo. L'addestramento consiste nell'insegnare a riconoscere i singoli caratteri e nel far scorrere la testina di lettura sul testo. A tale scopo esistono opportuni

nastrì che scorrono in modo automatico sotto il pollice del soggetto.

Per quanto riguarda la mobilità, il piú antico strumento di interazione con l'ambiente circostante per un non vedente, cioè il bastone, sembra possibile di una modernizzazione di ridotto impatto fisico, di costo ridotto e di ampia diffusione. Una delle apparecchiature di maggior successo è il bastone a raggi-eco munito di alcuni generatori a raggi laser o ad ultrasuoni. Questi raggi quando incontrano un ostacolo, danno luogo ad un'onda riflessa che viene captata come un eco da opportuni ricevitori posti sul bastone; i ricevitori a loro volta danno luogo ad un'uscita sonora oppure tattile per figurare il raggio riflesso.

Pur essendo costruiti da tempo e anche commercializzati, ausili di questo tipo non sembrano soddisfacenti per i ciechi che preferiscono il bastone oppure il cane opportunamente ammaestrati. Una ragione di questo è senz'altro l'invasività delle informazioni trasmesse: infatti il cieco utilizza l'udito per percepire i suoni provenienti dall'ambiente circostante e questo tipo di informazione può distrarlo invece che aiutarlo.

Negli USA sono allo studio delle protesi elettroniche per l'occhio, ma il carattere anche qui troppo invasivo e costoso dell'impianto ed il necessario e non scontato addestramento della corteccia visiva (in particolare per la visione stereoscopica) ne renderanno forse limitato l'impiego.

Capitolo 2

La stimolazione elettrotattile

2.1 Risposta tattile della mano

Prima di ogni possibile considerazione su quale tipo di segnale sia meglio utilizzare, è opportuno studiare quale parte del corpo umano sia la più indicata per recepire e distinguere la suddetta informazione. Se tocchiamo con il polpastrello il foglio che stiamo leggendo, sapremo immediatamente che il foglio è liscio, piuttosto morbido e a temperatura ambiente. Ovviamente questo ci indica che l'organo di senso del tatto, della sensibilità dolorifica e della sensibilità termica sta nella pelle.

La pelle è composta da diversi strati: i due più esterni, lo strato corneo e lo strato lucido, sono praticamente solo strati di rivestimento, privi di sensibilità; sotto si trovano gli altri strati dell'epidermide e del derma, i quali sono per così dire strati vivi, perché in essi vi sono le terminazioni nervose destinate a raccogliere le diverse sensazioni.

Per mezzo della pelle l'uomo avverte quattro diverse sensazioni: di contatto e pressione, di freddo, di caldo, di dolore. Ciascuna di queste viene avvertita non indistintamente sulla pelle, ma in diversi punti di essa, distanti tra loro alcuni millimetri. La distanza minima alla quale due stimoli puntiformi possono essere percepiti separatamente è di 1 mm sulla punta della lingua, 2mm sui polpastrelli delle dita delle mani, 4-5 mm sulle labbra, 31-32 mm sul dorso della mano e 60-70 mm sulla schiena.

Quando la pelle viene toccata o compressa, oppure viene a contatto con

Parte del corpo	Impulso statico	Vibrotattile	Elettrotattile
Falangi dita	3	2(b)	7
Palmo	10	?	8
Testa	17	?	?
Addome	36	?	10
Avambraccio	38	?	9
Schiena	39	11-18	5-10
Gambe	43	?	10
Braccio	44	?	9
Spalla	46	?	9

Tabella 2.1: Capacità di discriminare due punti di stimolazione diversi(mm)

corpi caldi o freddi, oppure subisce tagli, punture, sfregamenti o bruciature, le terminazioni nervose interessate registrano la sensazione ricevuta e la trasmettono immediatamente al cervello. Questo significa che esistono diverse categorie di terminazioni nervose, ognuna delle quali è preposta ad un determinato compito.

Rif.[]	Luogo	Variabili	Numero di livelli
107	Addome	Corrente	59
1	Addome	Corrente	32
114	Palmo	Frequenza	13
130	Braccio	Energia	8-16
130	Braccio	Frequenza	6-8
Schiena	39	11-18	5-10
Gambe	43	?	10
Braccio	44	?	9
Spalla	46	?	9

Tabella 2.2: Numero di livelli discriminabili in risposta alla stimolazione elettrotattile e vibrotattile

Le mani sono fra le parti del corpo che presentano la sensibilità più elevata. Per questo motivo e tenendo conto del fatto che la struttura robotica impegna comunque il palmo della sola mano, si limita lo studio della sensibilità al solo ambito di quest'ultima.

La caratterizzazione delle principali funzioni di tipo meccanico proprie

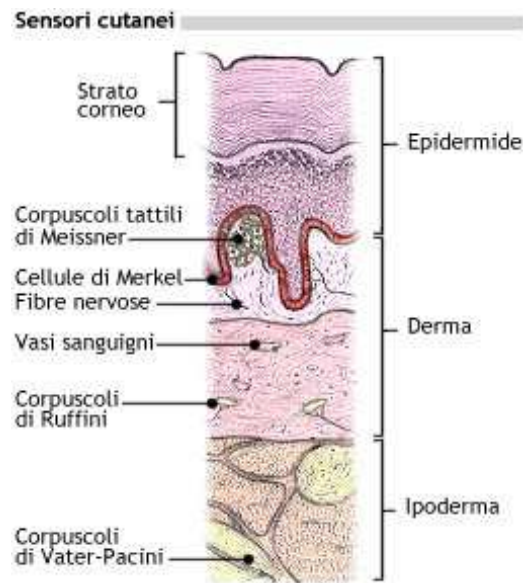


Figura 2.1: Sezione dell'epidermide e degli strati sottostanti, nella quale si possono osservare diversi organi recettori per le sensazioni cutanee.

del senso del tatto dipende dalle risposte dei recettori sensoriali periferici di stimoli pressori, i meccanocettori.

Nonostante una gran parte degli aspetti della trasduzione mecano-neurale sia ancora sconosciuta, sono individuate e studiate dal punto di vista anatomico e funzionale alcune terminazioni nervose specializzate. I principali tipi di meccanocettori presenti nell'insieme epidermide-derma sono:

- *corpuscoli di Meissner*, terminazioni nervose allungate ed incapsulate, sono situati nei peduncoli tra derma ed epidermide e vengono considerati sensori di velocità essendo particolarmente sensibili al movimento di oggetti sulla pelle oltre che a vibrazioni a bassa frequenza. Costituiscono circa la metà delle unità tattili e rispondono alle pressioni normali sviluppate dal contatto;
- *i dischi di Merkel*, che grazie alla loro adattabilità molto lenta forniscono l'informazione relativa alla permanenza del contatto di un oggetto sulla pelle, rilevando quindi i segnali statici di pressione; costituiscono circa il 5% del totale dei recettori della mano;

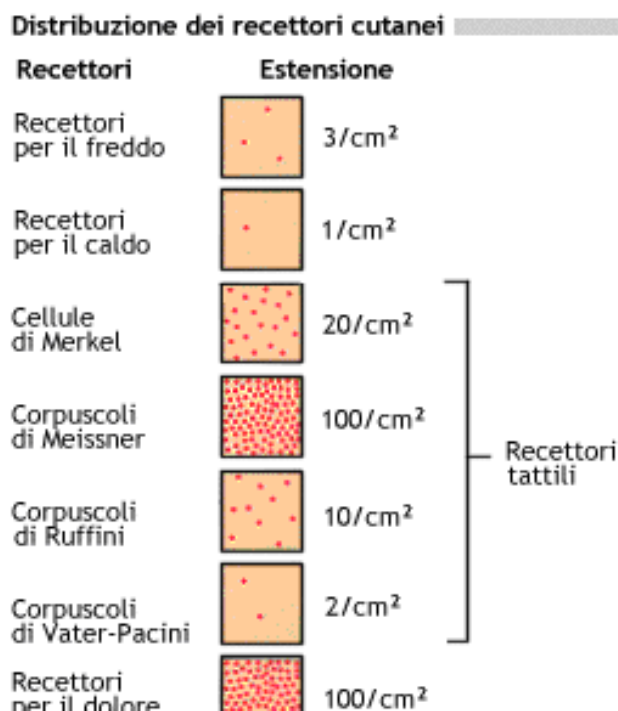


Figura 2.2: Le diverse concentrazioni di alcuni recettori della pelle

- *i corpuscoli di Ruffini*, strutture fusiformi incapsulati e ramificate nel derma e negli strati più profondi della pelle che costituiscono circa il 19 % del totale dei recettori della mano: a causa della loro struttura formata da una fitta rete di fibre di collagene, sono in grado di misurare le funzioni di taglio; inoltre sono i responsabili delle sensazioni di caldo;
- *i bulbi terminali di Krause*, situati più in superficie e più numerosi rispetto ai corpuscoli di Ruffini, sono i responsabili delle sensazioni di freddo;
- *i corpuscoli di Pacini*, recettori situati più in profondità all'interno del derma con dimensioni che vanno da 1 a 4 mm di lunghezza e da circa 0,5 a 1 mm di diametro; sono stimolati solo da movimenti molto rapidi del tessuto e si adattano allo stimolo in pochi centesimi di secondo: grazie a queste caratteristiche sono preposti alla detezione delle vibrazioni all'interno del tessuto;

- *terminazioni nervose libere* , localizzate ovunque, con diametro variabile tra 0,5 e 2,5 mm, con funzioni di termorecettori, recettori di dolore e di stimoli tattili pressori.

2.2 Stimolazione meccanica

Molti ricercatori ritengono che facendo passare della corrente elettrica attraverso la pelle si riesca a stimolare le differenti terminazioni nervose [1][2][3], in particolare Pfeiffer[4] sostiene di riuscire a stimolare direttamente i recettori della pelle con dei piccoli elettrodi di 1 mm. Gli esperimenti condotti in tal senso da Blamey e Clark [5] per la realizzazione di protesi applicate alle dita hanno però dimostrato che le sensazioni suscitate al sistema nervoso non sono necessariamente confinate in piccole regioni della pelle. Le sensazioni avvertite dai soggetti sottoposti a tali esperimenti sono assimilabili a vibrazione, pizzico, pressione, bruciore a seconda della tensione o corrente utilizzata, dalle dimensioni e materiali dell'elettrodo al punto della pelle di applicazione per finire all'umidità.

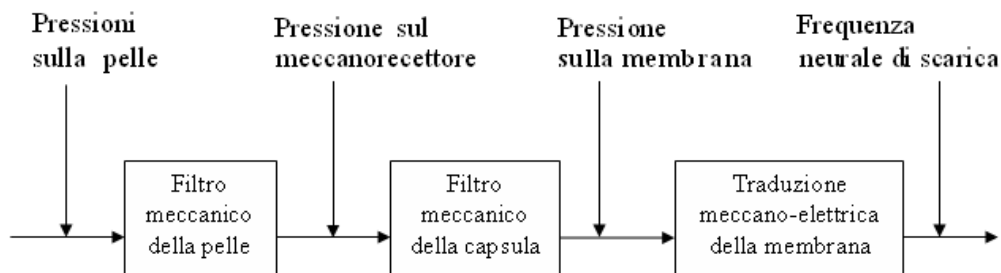


Figura 2.3: Schema delle componenti fondamentali che influenzano la risposta temporale di un meccanorecettore.

Spesso si preferisce così agli elettrodi superficiali una stimolazione sottocutanea, che abbassa notevolmente la richiesta di tensione applicata, allunga i tempi di sensibilità a tali impulsi, e comporta la stabilità meccanica dell'interfaccia dell'elettrodo e l'eliminazione del disturbo di montare e smontare ogni volta il tutto. Anche la stimolazione del bulbo pilifero con opportuni elettrodi produce una sensazione di dolore acuto a seconda della profondità dell'inserimento. Se si sottopone un pezzo di pelle asciutta

a una stimolazione di 50 Hz si può riscontrare una debole vibrazione avvertita come una corrente di $2 \mu\text{A}$. Grimms [6] definisce questa sensazione elettrovibrazione, una sensazione di vibrazione appunto, dovuta alla deformazione meccanica-elettrostatica della pelle e non alla stimolazione elettrica dei neuroni.

Grazie alle caratteristiche di veloce adattabilità allo stimolo applicato, i corpuscoli di Pacini sono i recettori che meglio si prestano ad essere utilizzati per recepire una vibrazione. E' proprio attraverso questi recettori sensoriali che avverrà la percezione del segnale che porta l'informazione che si vuol far giungere al non vedente.

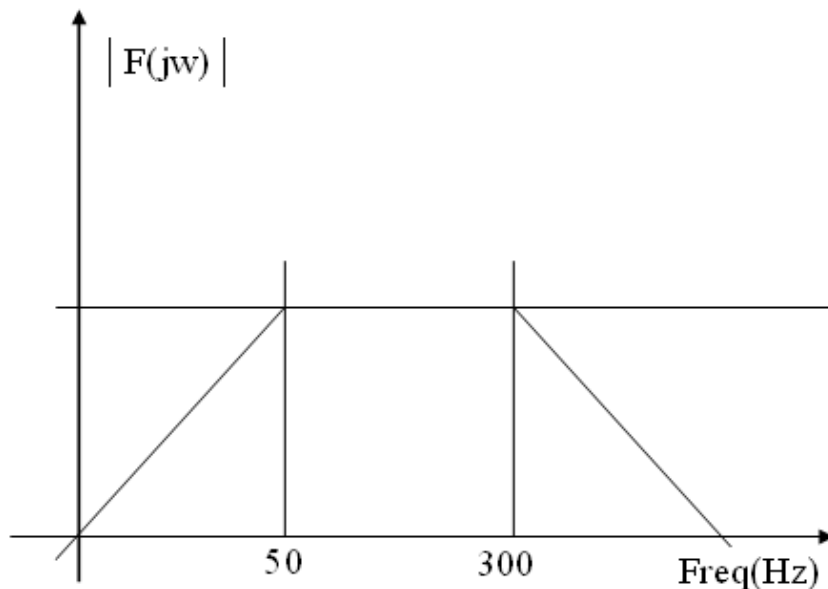


Figura 2.4: Risposta frequenziale della funzione di trasferimento tra la pressione applicata alla pelle e la pressione sul recettore

Poiché i corpuscoli di Pacini sono quelli situati più in profondità nella pelle, bisogna considerare l'effetto filtrante sia dell'epidermide che del derma. Quando si applica uno stimolo sulla superficie della pelle, la pressione effettivamente applicata alla parte sensibile del corpuscolo non di-

pende solo dall'intensità dello stimolo, ma anche dalla legge temporale di applicazione. Infatti la pelle si comporta come un mezzo visco-elastico non lineare. Nel caso di piccole deformazioni, le caratteristiche dei parametri della pelle fanno sì che essa abbia un comportamento passa-banda.

Gli effetti filtranti a bassa frequenza sono dovuti principalmente ai fluidi contenuti nei tessuti (effetti viscosi), mentre l'attenuazione ad alta frequenza è dovuta agli effetti inerziali della massa della pelle.

Oltre all'effetto passa-banda della pelle, bisogna tener conto della capsula dentro la quale è protetto il corpuscolo di Pacini, che attenua ulteriormente lo stimolo nella banda di frequenze non comprese tra i 50 e i 300 Hertz. Volendo quindi utilizzare la mano per trasmettere al soggetto cieco l'informazione concernente il colore, è opportuno considerare l'applicazione di segnali con frequenze strettamente comprese nel suddetto intervallo.

2.3 Elettrochimica dell'interfaccia elettrodo-pelle

Poiché il flusso di corrente attraverso la pelle è ionico, il trasduttore deve convertire la corrente in flusso ionico[7]. Per ridurre l'irritazione e i danni sull'epidermide non si dovrebbero introdurre su di essa ioni non attivi. L'elettrodo inoltre non dovrebbe presentare reazioni chimiche che creerebbero uno strato isolante fra l'elettrodo stesso e la pelle. I materiali più usati sono: argento, platino e oro.

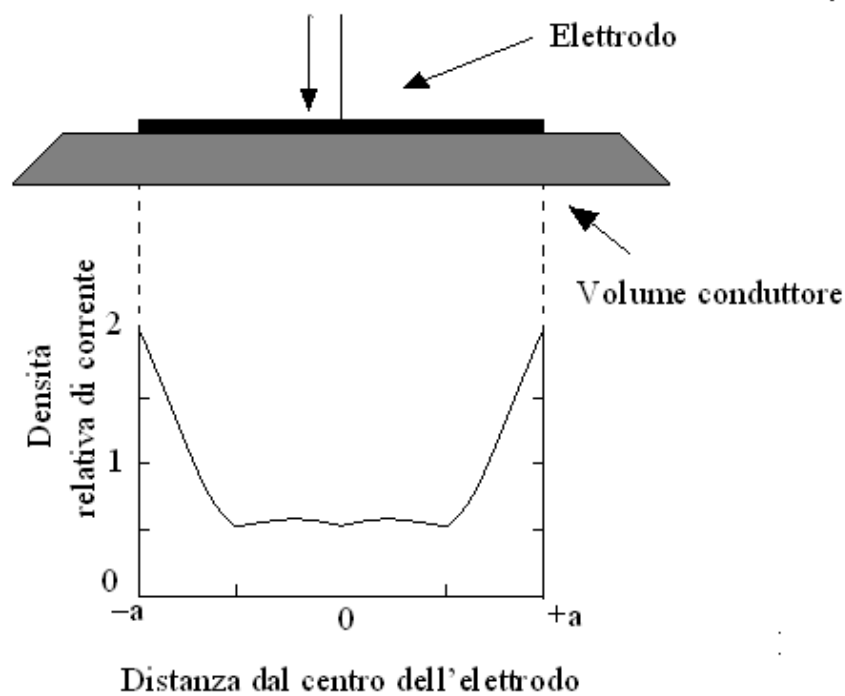


Figura 2.5: La densità di corrente sulla superficie di un conduttore dal volume omogeneo è funzione della distanza dal centro di un elettrodo circolare di stimolazione

La reazione elettrodo-pelle cresce all'aumentare della densità di corrente J , pertanto sarebbe necessario avere una J la più regolare e uniforme possibile, ma come si evince dal grafico che mostra una sezione trasversale del trasduttore la J è molto più alta ai bordi che al centro.

Inoltre Grimms[52] e Sounders[104] hanno dimostrato che la corrente fluisce in regioni della pelle a più bassa resistenza(ad esempio per la pre-

senza di ghiandole sebacee). Questo non fa altro che aumentare la non uniformità di J . Grimms propone l'ELETTRO-OSMOSI, ovvero il convoglio di acqua nei pori della pelle attraverso un elettrodo negativo. Ciò comporterebbe un discreto aumento della conduttanza dei pori e un feedback positivo per la trasmissione. La resistenza dell'adesivo inoltre è utile per eguagliare la corrente in parecchi percorsi, anche se uno potrebbe essere a più bassa resistenza dell'altra o un poro meno umido dell'altro; in ogni caso tale meccanismo non è ancora chiaro.

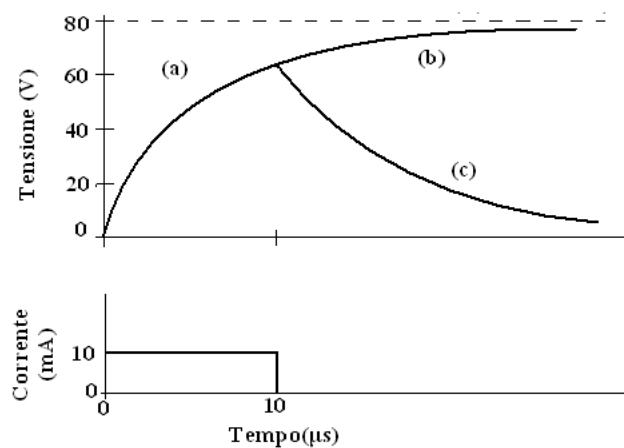


Figura 2.6: Tensione avvertita su 12 mm^2 di pelle stimolata da un elettrodo coassiale con un impulso di corrente di $10 \mu\text{s}$. (a) regione di carica; (b) regione resistiva; (c) regione di scarica.

Il valore resistivo dell'interfaccia elettrodo-pelle scende drasticamente all'aumentare della corrente[8][9]; tale variazione è situata nello strato corneo[8] e ciò fa sì che si preferisca stimolare gli elettrodi con correnti costanti più che con tensioni costanti. Uno degli svantaggi dell'operare a corrente costante è nel caso non si abbia un buon contatto pelle-elettrodo e questo fa sì che si riduca l'area effettiva, aumenti la densità J e così si avverta uno stimolo molto più forte di quello voluto. Sounders[10] consiglia allora di operare a valori di potenza costanti.

2.4 Soglia di sensibilità e del dolore

Un parametro molto importante da conoscere per la progettazione di un trasduttore tattile è il rapporto fra la soglia del dolore e la soglia di sensibilità: P/S (threshold of pain / threshold of sensation). Studi effettuati ci mostrano come P/S possa variare da un minimo di 2 (6 dB) a un massimo di 10 (20dB), tale campo di variazione appare limitato se confrontato agli altri sensi: per l'udito il range è di 120 dB mentre per la vista di 70dB; se però assumiamo un'impulso di 0.5mm per uno stimolatore di $0,78 \text{ m}^2$ il campo di variazione della vibrostolazione tattile della pelle si aggira intorno ai 40 dB. Ciò è il risultato ottenuto dalla comparazione del lavoro di molti ricercatori che hanno determinato la corrente richiesta per stimolare la sensibilità e il dolore dell'individuo. Tuttavia è difficile formulare un modello della soglia che sia funzione delle dimensioni dell'elettrodo, del materiale, delle forme d'onda, ecc..., in quanto ciascun ricercatore applica metodologie diverse; quattro però sono i fattori più importanti che impediscono di arrivare a un modello unico:

- la mancanza di una definizione certa e univoca di dolore
- le condizioni psicologiche: lo stesso soggetto può rivelare due soglie diverse in due momenti diversi.
- la soglia del dolore può essere influenzato in positivo o negativo dal calore indotto.
- il P/S è funzione delle dimensioni dell'elettrodo, dei materiali del posizionamento dell'impulso e questi parametri raramente vengono trascritti negli esperimenti.

Infine le stesse condizioni della pelle hanno una profonda influenza sul range di variazione: la pelle bagnata ha un'alta impedenza e dà una sensazione di prurito dovuto alla distribuzione della corrente non uniforme. Un buon compromesso può essere raggiunto con l'ausilio di gel speciali da applicare fra l'elettrodo e la pelle; negli ultimi anni anche gli elettrodi in commercio sono già dotati di uno strato di gel; purtroppo questo strato

ha una durata limitata nelle ore di utilizzo. Infine l'ultimo fattore ma non ultimo di importanza è il posizionamento dell'elettrodo: anche uno spostamento minimo di 1 mm può portare dei cambiamenti significativi nella soglia di dolore.

2.4.1 Meccanismi legati alla soglia del dolore

La figura 2.7 mostra come il valore di corrente richiesto per la soglia di sensibilità aumenta con il diminuire dell'ampiezza dell'impulso, ciò suggerisce come la soglia di sensibilità sia legata alla carica fornita dall'impulso (corrente per durata).

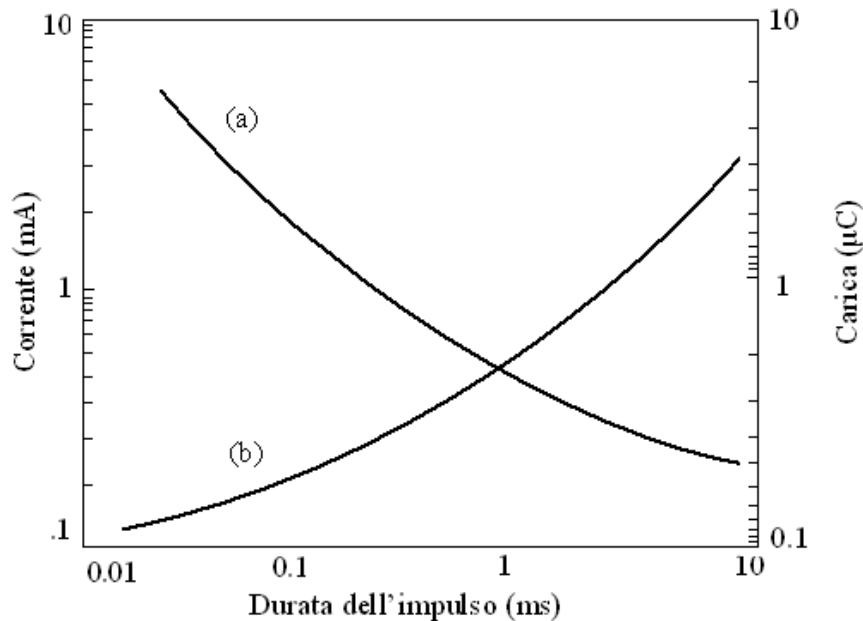


Figura 2.7: Soglia di stimolazione elettrotattile, (a) corrente e (b) carica funzioni della durata dell'impulso

Sempre la figura 2.7 mostra come per impulsi la cui durata sia superiore a 100micros il valore della corrente di soglia aumenta drasticamente, dando così ragione a Rollman[2] e Girvin[11] sull'inutilizzabilità del metodo dell'integrale per tempi dell'ordine di 5ms. Due possono essere i responsabili di questo integrale temporale:

- l'accumulo temporaneo di carica da parte dell'interfaccia elettrodo-pelle; tale interfaccia ha una propria costante di tempo che può variare da $10 \mu s$ a 1 ms. a seconda delle condizioni della pelle e dello stimolo[9]
- I terminali nervosi presenti nella membrana accumulano carica.

Butifoker e Lawrence[12] usano il modello di Frankenhauser-Huxley[13] per predire la soglia di dolore in una certa zona della pelle caratterizzata da una certa terminazione nervosa corrispondente. Altri ricercatori come Gaddes e Baker[14] prediligono invece la formulazione di modelli matematici per la relazione ampiezza-durata. A causa del limite dell'integrale temporale per la pelle e della riduzione del range in seguito a impulsi prolungati si può affermare che il più appropriato sia un impulso di 0.5 ms come appunto sostengono Saunders e Collins[15]. Inoltre un altro punto da osservare è come con impulsi maggiori di 0.5 ms la soglia del dolore si abbassi molto più in fretta di quella della sensibilità, dimostrando così che due diversi metodi di integrazione regolano le due soglie.

Il rapporto P/S aumenta con le dimensioni dell'elettrodo, Saunders[10],[16] ha scoperto che l'area ideale su cui applicare un elettrodo metallico è $10-15 \text{ mm}^2$: giusto compromesso fra gli elettrodi più grandi (alto P/S) e quelli più piccoli (basse possibilità di assuefazione). Tali dimensioni non sono da ritenere assolute, Gibson [46] parla di 174 mm^2 necessari per una pelle ricoperta di peli e 50 mm^2 per una superficie totalmente glabra. Per quanto riguarda l'ampiezza stessa dell'impulso Solomonow e Preziosi[17] applicano correnti di 2 mA per le zone più sensibili e 7 mA per la superficie della mano o del piede. Ad affiancare questa ricerca più empirica ci sono per la verità molti modelli matematici che si occupano della risposta nervosa a stimoli esterni[18][19], di questi però solo Larkin e Rattay si soffermano a elettrodi di superficie; altri usano tecniche molto più invasive. Rattay[18] non considera gli effetti capacitivi: il suo modello è un modello statico mentre Larkin preferisce idealizzare l'interfaccia in solo punto di applicazione.

Capitolo 3

Organizzazione teorica

3.1 Fondamenti fisiologici della visione

Il sistema visivo umano è parte del sistema nervoso, il quale è senza dubbio la più complicata rete di comunicazione esistente ed è controllata dal più potente computer mai progettato: il cervello.

L'informazione visiva è recepita dall'uomo attraverso la via ottica composta dai mezzi rifrangenti, dalla retina (che insieme formano il bulbo oculare) e dal sistema nervoso associato al sistema di visione. I mezzi rifrangenti (cornea, umor acqueo, cristallino, corpo vitreo) hanno lo scopo di formare sulla retina una rappresentazione bidimensionale delle radiazioni luminose presenti nel campo visivo.

La luce entra nell'occhio attraverso la cornea. Quest'ultima è una membrana trasparente di curvatura superiore a quella del bulbo oculare per garantire una rifrazione costante dei raggi luminosi provenienti da una qualunque direzione del campo visivo. L'intensità luminosa che entra nell'occhio è regolata dalla pupilla, un diaframma di diametro variabile da 2 a 9 *mm*. Il cristallino è una lente a convessità variabile, allo scopo di focalizzare sulla retina l'immagine indipendentemente dalla distanza. A meno di difetti geometrici del bulbo (ipermetropia, miopia, presbiopia, astigmatismo), questo perfetto meccanismo focalizza sulla retina una rappresentazione bidimensionale che produce l'immagine presente nel cam-

po visivo. In realtà a causa dell'effetto di schermo della pupilla, anche un occhio sano subisce gli effetti dell'aberrazione sferica.

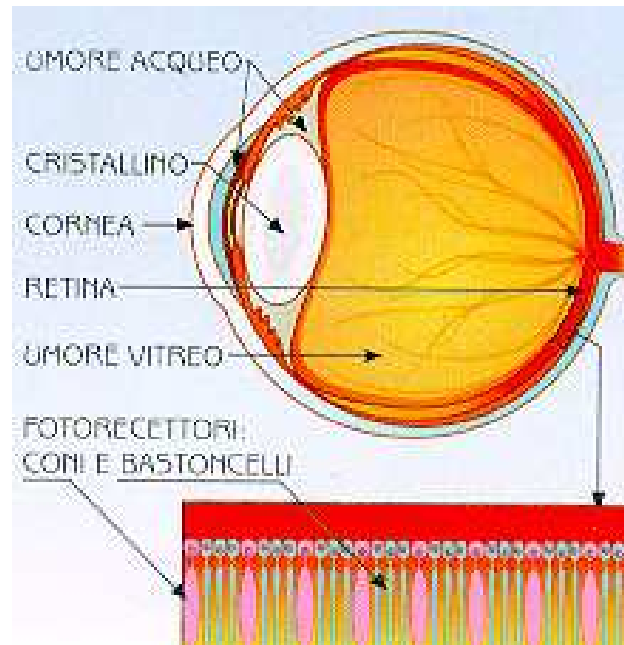


Figura 3.1: Sezione ingrandita dell'orbita oculare

Questo fenomeno si può rappresentare come un filtraggio passa basso nello spazio. Nella retina le radiazioni luminose sono convertite in segnali bioelettrici. La retina è principalmente costituita da fotorecettori, neuroni specializzati in grado di indurre variazioni nel potenziale di membrana se colpiti da radiazioni elettromagnetiche che cadono nello spettro del visibile. Poi l'informazione visiva viaggia sotto forma di segnale bioelettrico tra i neuroni. Infine il nervo ottico provvede alla comunicazione con il cervello.

3.2 Il colore in formato IHS

L'uso di basi di colori RGB per le varie codifiche di colori in monitor, stampanti, scanner ecc, non è l'unica scelta possibile. Un'alternativa è rappresentata dal modello HSV (Hue, Saturation, Value), meno conosciuta della più usata codifica RGB, ma sicuramente più funzionale per il nostro progetto.

Il modello di colore HSV è un cono a base rotonda, un cerchio di Newton, di raggio S (saturazione, determina la preponderanza del colore) e altezza V (valore o intensità o brillantezza, determina la quantità di bianco in valore percentuale, da 0% a 100%). La terza componente, Hue, codifica la frequenza dell'onda luminosa come un angolo (da 0 a 360).

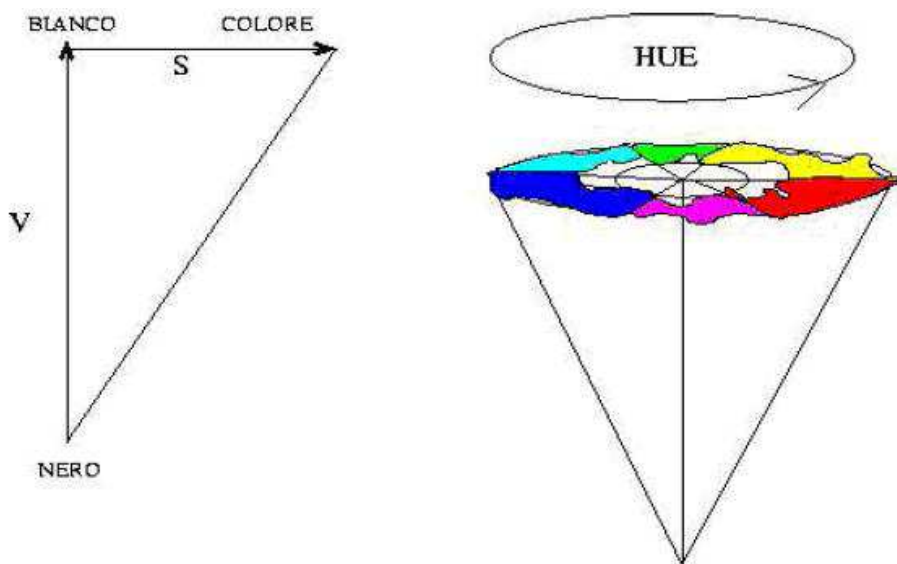


Figura 3.2: Modello di colore HSV

La figura mostra l'idea di questo modello: sulla destra abbiamo il cono che definisce i vari colori, sulla sinistra la sua sezione. Il cono è una figura solida, ogni punto del cono è identificato da tre coordinate numeriche, una tripla di valori H, S e V, e rappresenta un colore. Quello che nella figura non è rappresentato bene è la graduale sfumatura da colore a bianco man mano che si procede dalla circonferenza della base verso il centro.

Riguardo il cerchio dei colori di Newton, esso è il risultato di una serie di esperimenti condotti dal famoso fisico Isaac Newton utilizzando un prisma. Newton dapprima identificò i tre colori base Rosso, Verde e Blu, divise un cerchio in tre spicchi identici ed assegnò a ciascuno spicchio uno dei tre colori identificati. In seguito divise ulteriormente ciascuno spicchio a metà e in mezzo ad ogni coppia di colori di base inserì il colore risultante dalla loro composizione.

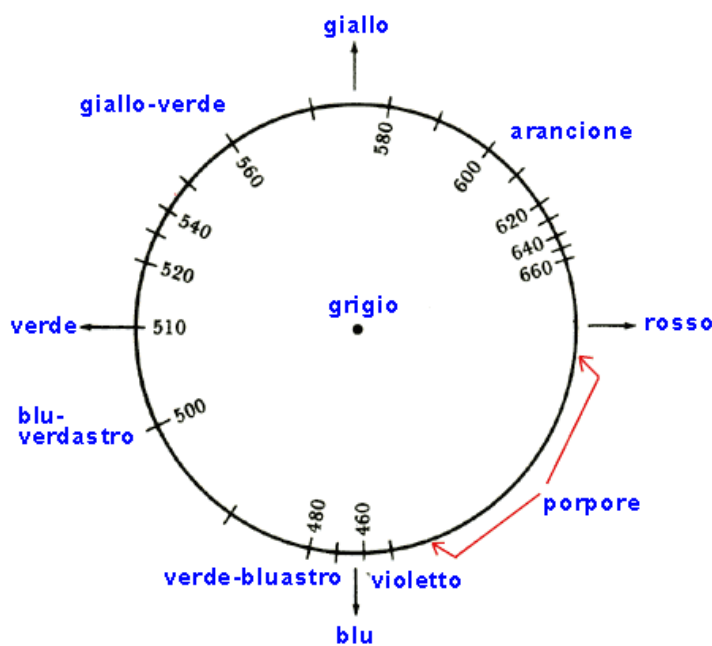


Figura 3.3: Ruota dei colori contenente anche i colori non spettrali (porpore). I numeri rappresentano la frequenza in nanometri della luce

Gli acronimi HSV, HSB e HSL possono risultare oscuri se non si comprende il significato dei componenti dei colori. Le seguenti definizioni illustrano le qualità dei colori che consentono di descrivere uno specifico colore.

- *Hue (tonalità)* . La tonalità è quanto viene percepito quale principale qualità distinguibile di un colore visualizzato.

I colori Blu scuro, azzurro pastello e blu pervinca appartengono tutti alla tonalità nello spettro visibile che è composto principalmente



Figura 3.4: Cambiamenti del colore, variando un parametro e mantenendo costante gli altri due.

dalle lunghezze d'onda che producono il blu. La quantità di nero o bianco che viene aggiunta al colore ha effetto sulla sfumatura o tinta di una tonalità .

- *Saturation (saturazione)* . La saturazione è la misura dell'energia relativa di una lunghezza d'onda della luce. Un pezzetto blu di candito, ad esempio, appare ricco nel colore riflesso in direzione dell'osservatore, perché il blu viene riflesso mentre le altre lunghezze d'onda della luce nello spettro visibile vengono quasi completamente assorbite dal candito. Una scena con una bassa saturazione, come una fotografia in bianco e nero, non ha una tonalità predominante e tutte le frequenze delle lunghezze d'onda della luce sono riflesse dalla fotografie in ugual misura.
- *Brightness, Lightness, Value (brillantezza, luminosità, valore)* . Questi tre termini sono diventati sinonimi, quando riferiti ai colori del computer, fondamentalmente perché queste qualità dei colori descrivono come la luce fisica (non la luce generata da un monitor) viene riflessa da una superficie. Brightness è la misura dell'entità della luce riflessa da una superficie. Lightness è una combinazione di saturazione di colore e luminosità; è una descrizione più accurata del fenomeno

di riproduzione dei colori del mondo reale, ma il modello HLS nella sua accuratezza è più difficile da gestire da parte degli artisti. Valore è la misura relativa delle quantità di puro nero o bianco aggiunte a un colore per produrre una sfumatura (colore frammisto con il nero) o una tinta (colore frammisto con il bianco)

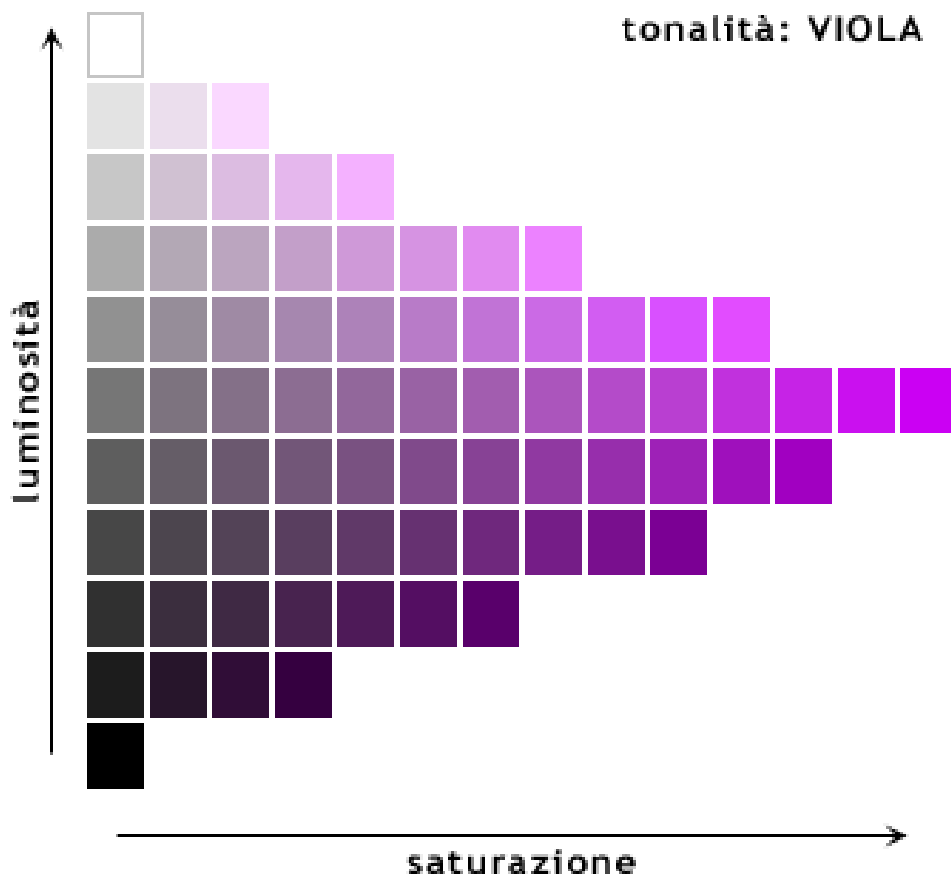


Figura 3.5: Influenza della luminosità e della saturazione sulla percezione di un colore

3.3 Soluzione

Essendo in precedenza già stato elaborato un prototipo di trasduzione tattile del colore nell'ambito del progetto VIDET[20] con codifica RGB e avven-

done esaminato tutti i limiti si è preferito ricorrere a un sistema di codifica IHS, sicuramente meno conosciuto ma più congeniale ai nostri intenti.

Il precedente apparato disponeva di tre trasduttori (uno per il giallo, uno per il blu, uno per il rosso) applicati sulle tre falangi digitali di indice, medio e anulare, ciascuno in grado di trasmettere tre diversi segnali (alto, medio, basso) a seconda della concentrazione dei colori primari nel colore desiderato. Innanzitutto era necessario codificare tutti i colori realizzabili tramite una terna di valori. Tale codifica doveva essere memorizzata dal non vedente, il quale a sua volta doveva essere in grado di ricordarli rapidamente. Infine dopo pochi istanti di uso non si percepiva nettamente neanche l'ampiezza del segnale, confondendo in particolar modo il livello alto con quello medio.

Attraverso la nostra idea di codifica questi problemi sono risolti. Innanzitutto noi applichiamo un cerchio cromatico virtuale sul palmo della mano comunicando al non vedente la posizione dei tre colori primari (unico dato da memorizzare). Il non vedente a sua volta, percepito lo stimolo, non dovrà fare altro che capire fra quali colori si trova e a quale è più vicino. Ad esempio se avverte uno stimolo tra il blu e giallo, il soggetto sa che si tratta di un verde, in particolar modo se più prossimo al blu di un verdone, se più prossimo al giallo di un verde pastello. In questo modo forniamo la prima delle tre informazioni IHS, ovvero il colore.

Per quanto riguarda il secondo componente: l'intensità, essa sarà riconoscibile dal non vedente tramite l'entità stessa dell'impulso, ovvero dell'ampiezza del segnale che rappresenta con continuità l'intensità del colore. Più forte sarà il segnale più brillante sarà il colore, se invece sarà appena percettibile si tratterà di un colore piuttosto opaco.

L'ultimo parametro è rappresentato dalla saturazione, ovvero la rappresentazione dei grigi. In questo caso si passa dal bianco in cui è tutto il cerchio a vibrare in maniera forte al nero in cui c'è assenza di segnale, passando per gli stadi intermedi.

Il tutto è realizzabile tramite un mouse su cui il cieco può appoggiare la mano e da cui partono gli stimoli, in particolare nel prototipo realizzato ci sono sei trasduttori, tre per i colori primari, tre per gli intermedi

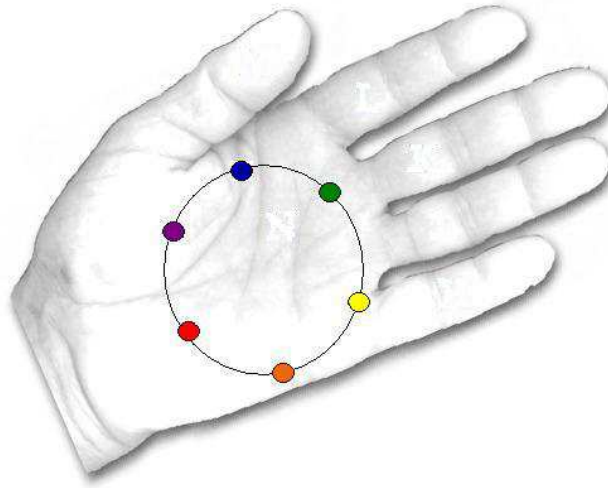


Figura 3.6: Posizionamento dei sei attuatori sul palmo della mano

principali. Tali trasduttori vengono opportunamente pilotati da un pannello di controllo dove vengono trasformati i segnali analogici in ingresso rappresentanti i colori in segnali digitali opportunamente modulati.

Capitolo 4

HARDWARE

4.1 Schema generale

Lo schema dell'attuatore consta di cinque macro blocchi: un circuito di enable, un oscillatore, uno stadio di ingresso, un driver ed un attuatore.



Figura 4.1: Schema a blocchi del circuito

Il circuito di enable, provvede all'accensione e allo spegnimento dell'intero circuito. In particolare attiva o disattiva l'uscita dell'oscillatore che genera le forme d'onda necessarie al funzionamento dei blocchi successivi e quindi, dell'attuatore stesso.

L'oscillatore è costituito da due sottoblocchi equivalenti; esso alterna sulla sua uscita un treno di impulsi a un segnale basso ogni 0.5 secondi.

Lo stadio d'ingresso è il blocco che trasforma, tramite un **and** logico, il segnale analogico legato alla hue del colore in un treno di impulsi elettri-

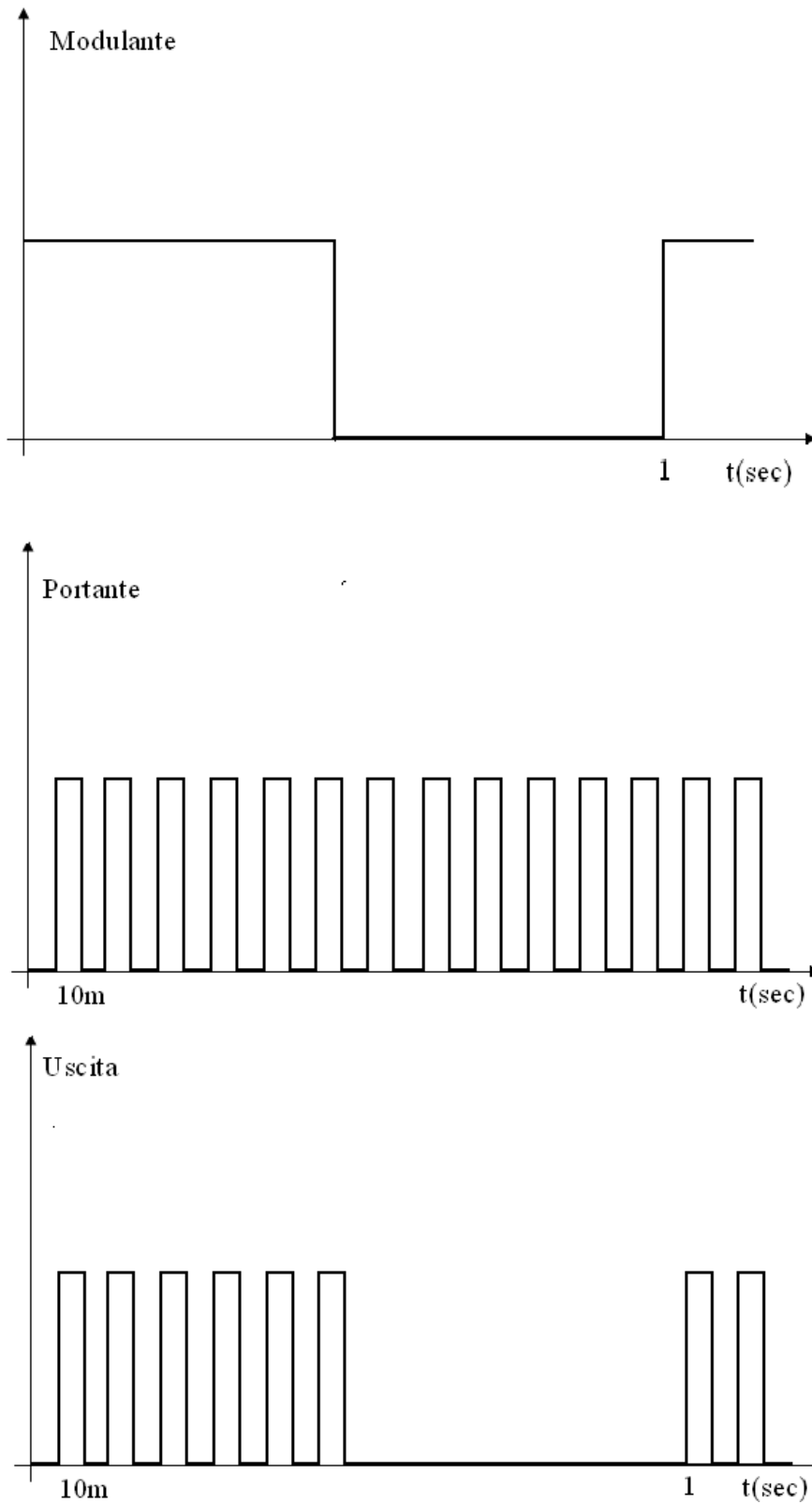


Figura 4.2: Forme d'onda relative al primo e al secondo blocco e all'uscita stessa del timer 556 con frequenza 1 Hz

ci, che verranno poi convertiti dall'attuatore in vibrazioni meccaniche. Ai suoi due ingressi vengono posti l'uscita dell'oscillatore e il segnale analogico contenente informazioni sulla hue. Sulla sua uscita ritroviamo nuovamente un segnale legato all'intensità del colore, questa volta però, in forma digitale.

Il driver permette di amplificare il segnale in potenza in modo da poter azionare l'SD180. E' necessario infatti portare le tensioni di lavoro del sistema fino a 12 volt.

L'attuatore infine è il blocco che traduce gli impulsi elettrici in impulsi meccanici. La loro ampiezza è stabilita dalla modulazione avvenuta a livello dell'and e la loro durata dall'oscillatore.

Per aumentare il valore della tensione di uscita sul carico, si utilizza un amplificatore operazionale configurato ad inseguitore.

4.2 Stadio di enable

Lo stadio di enable è costituito da un 'interruttore, un bjt npn ed un bjt pnp collegati come in figura ???. Entrambi i transistor hanno una configurazione a collettore comune e quando l'interruttore e' aperto la base di q1 e' a massa e di conseguenza q2 e' spento; la tensione sul nodo out e' quindi alta, mantenendo cosi' attivo il reset dell'oscillatore collegato a valle. Quando l'interruttore e' chiuso q1 conduce (in regione di saturazione) e anche q2 si accende, rendendo il segnale sul nodo di uscita basso. In questo modo l'oscillatore posto a valle puo' iniziare le sue fasi di carica e scarica.

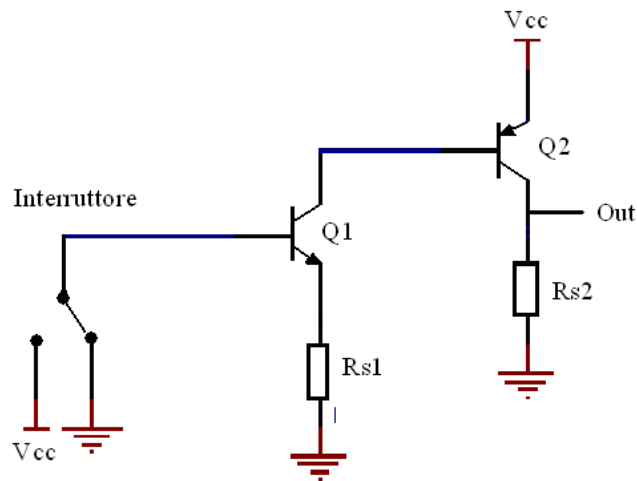


Figura 4.3: Stadio di enable

4.3 Oscillatore

L'oscillatore è in grado di produrre un'onda quadra di circa 4 volt di ampiezza picco-picco, ottenuta tramite la modulazione di un'onda quadra portante con frequenza $f_a = 100$ Hertz e un'onda quadra modulante con frequenza $f_b = 1$ Hertz. L'uscita dell'oscillatore, posta in ingresso all'AND insieme al segnale analogico esterno, permette di fornire allo stadio di uscita un segnale ad onda quadra invece di un segnale continuo.

Esistono in commercio dei temporizzatori adatti a questo ruolo: il più diffuso è il timer 555. Avendo bisogno di un timer per il segnale modulante ed uno per la portante, si è utilizzato un 556 che contiene due 555 integrati nello stesso package.

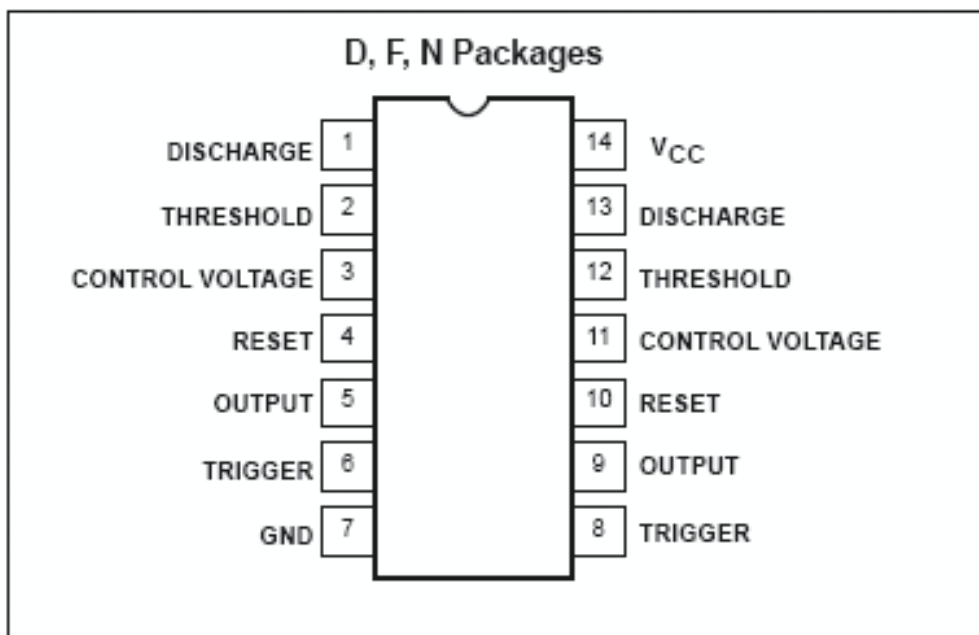


Figura 4.4: Piedinatura del timer 556

Il timer 556 può produrre accurate temporizzazioni, da alcuni microsecondi ad alcune decine di minuti, ed è in grado di erogare in uscita una corrente sufficiente a non richiedere ulteriori stadi di buffer (200 mA) e a non degradare le caratteristiche della forma d'onda.

Il circuito da realizzare è in realtà un doppio circuito astabile che deve

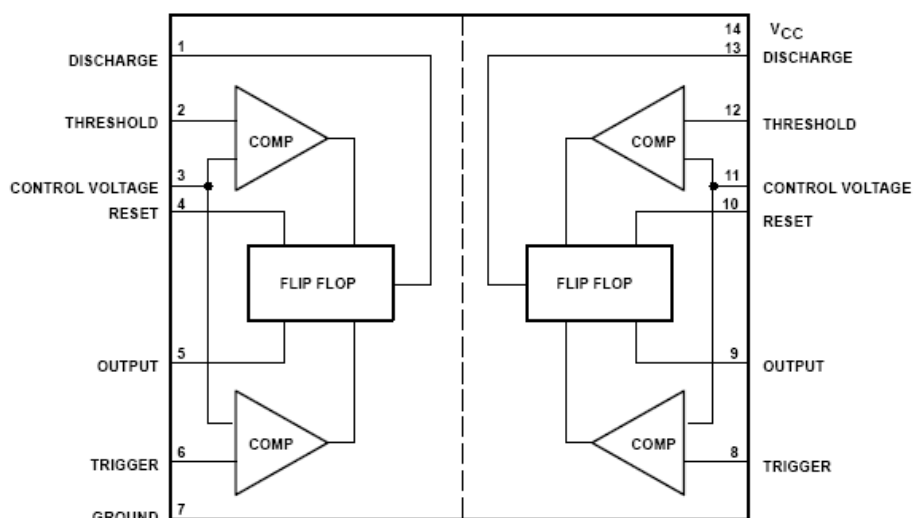


Figura 4.5: Schema logico equivalente del timer 556

oscillare rispettivamente a 1 Hz e a 100 Hz con duty cycle del 50 %. Lo schema del circuito è riportato in figura 4.6 mentre le forme d'onda relative sono riportate in figura 4.7.

Il condensatore C si carica alla tensione V_{cc} attraverso le resistenze R_a e R_b , ($R_b = R_{b1} + R_{b2}$). Essendo però connesso all'ingresso di threshold del 556, appena V_c raggiunge il valore di soglia ($2V_{cc}/3$), il latch del 556 viene resettato, quindi l'uscita out passa a livello basso e il transistor di scarica entra in saturazione. Il condensatore pertanto si scarica attraverso la resistenza R_b ed il transistor di discharge contenuto nel 556. La tensione del condensatore tende a zero, però non riesce a raggiungere tale valore in quanto C è connesso all'ingresso di trigger del 556 e, quando $V_c = V_{cc}/3$, il latch del 556 viene nuovamente settato, l'uscita out passa a livello alto e il transistor di scarica viene bloccato. Inizia allora una nuova fase di carica del condensatore.

Il condensatore C' , connesso tra l'ingresso control voltage e massa, serve a evitare che disturbi sul pin d'ingresso non collegato modifichino la durata della forma d'onda di uscita. Dunque il suo valore non è

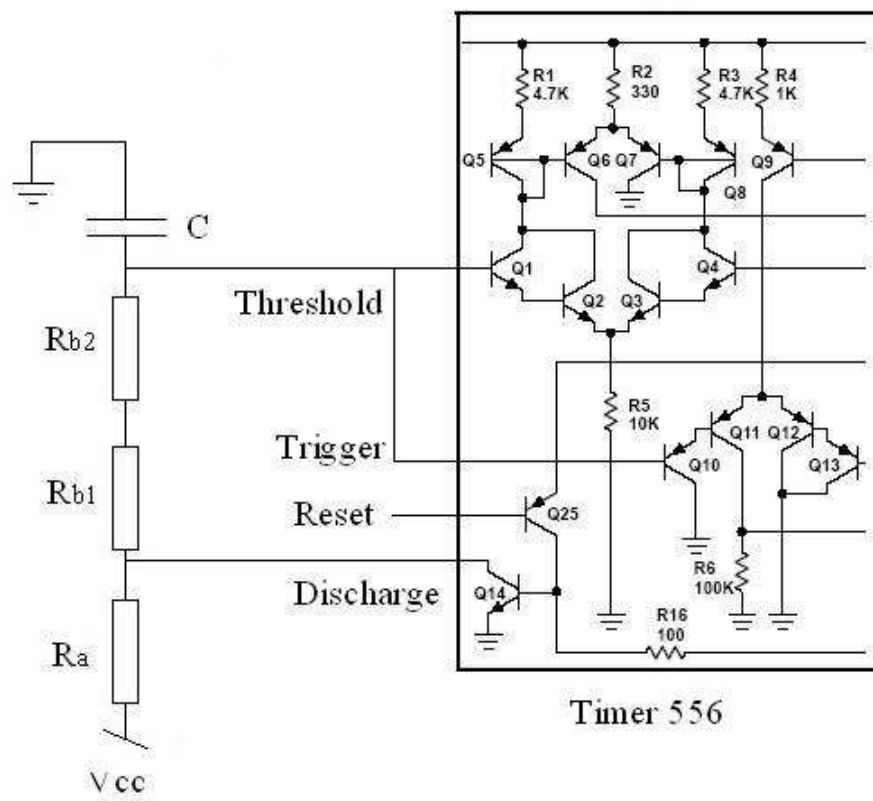


Figura 4.6: Schema del circuito monostabile realizzato con il primo blocco del timer 556

significativo ($C'=100\text{nF}$)

4.3.1 Fase di carica

Il condensatore C inizialmente è carico con una tensione $V_c=V_{cc}/3$ (a regime). Attraverso le resistenze R_a e R_b , esso tende a portarsi alla tensione di alimentazione V_{cc} , con costante di tempo $(R_a+R_b)C$, per cui l'equazione di carica è:

$$v_c = V_{cc} + (V_{cc}/3 - V_{cc}) * e^{-t'/(R_a+R_b)*C}$$

La carica è interrotta, però, all'istante $t^*=T1$, in cui $V_c=2V_{cc}/3$, per cui si ha:

$$2V_{cc}/3 = V_{cc} + (V_{cc}/3 - V_{cc}) * e^{-T1/(R_a+R_b)*C}$$

Da cui si ottiene l'intervallo di tempo di carica $T1$:

$$T1 = (R_a + R_b)C \ln 2 = 0.693(R_a + R_b)C$$

4.3.2 Fase di scarica

Il condensatore C, è inizialmente carico con una tensione $V_c=2V_{cc}/3$. Attraverso la resistenza R_b esso tende a scaricarsi con una costante di tempo R_bC , per cui l'equazione di scarica è:

$$v_c = (2V_{cc}/3) * e^{-t''/R_b*C}$$

La scarica però, è interrotta all'istante $t^*=t2$, in cui $V_c=V_{cc}/3$, per cui si ha:

$$V_{cc}/3 = (2V_{cc}/3) * e^{-T2/R_b*C}$$

Da cui si ottiene l'intervallo di tempo di scarica T_2 :

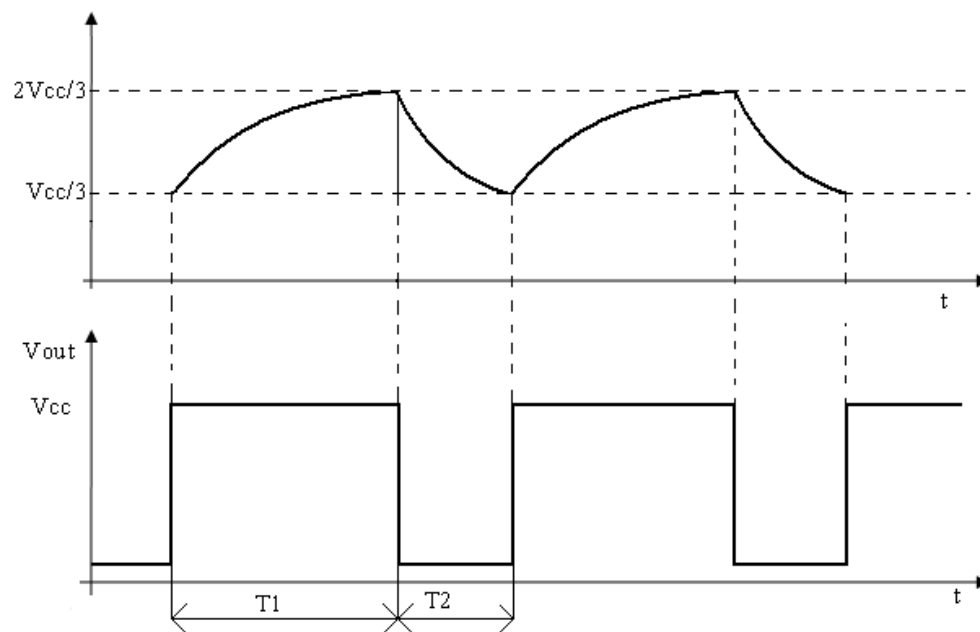


Figura 4.7: forme d'onda relativa al processo di carica e scarica del condensatore

$$T_2 = R_b C \ln 2 = 0,693 R_b C$$

4.3.3 Dimensionamenti e duty cycle

Il periodo T di oscillazione dell'astabile vale pertanto:

$$T = T_1 + T_2 = 0,693(R_a + R_b)C$$

La frequenza f di oscillazione è:

$$f = 1/T = \frac{1,44}{(R_a + R_b)C}$$

Il duty cycle δ , definito come il rapporto fra l'intervallo di tempo in cui l'uscita è alta e l'intero periodo di oscillazione, vale:

$$\delta = T_1/T = \frac{(R_a + R_b)}{(R_a + 2R_b)}$$

Posto:

- $R_{b1} = 10 R_a$
- R_{b2} compreso tra 0 e $100 R_a$

Otteniamo che $R_b = R_{b1} + R_{b2}$ può variare fra:

- $R_{bmin} = R_{b1} = 10 R_a$
- $R_{bmax} = 10 R_a + 100 R_a = 110 R_a$

Con relativa f variabile fra:

$$f_{min} = \frac{1,44}{(R_a + 2R_{bmax})C} = \frac{1,44}{221 * R_a * C}$$

$$f_{max} = \frac{1,44}{(R_a + 2R_{bmin})C} = \frac{1,44}{21 * R_a * C}$$

Da cui:

$$\delta_{min} = \frac{10}{21} = 47,6$$

$$\delta_{max} = \frac{110}{221} = 49,6$$

Si può notare che comunque si scelga il valore di Rb2, si ottiene un duty cycle che si attesta intorno al 50%.

4.3.4 Scelta dei valori di capacità e resistenze

Volendo ottenere una certa $f_{min} = 20\text{Hertz}$ la capacità C resta dunque funzione della sola resistenza R_b . Sapendo che $R_a = 1.5\text{K}\Omega$

Nell'oscillatore di range ($20 \div 200\text{Hz}$) :

$$C = \frac{1,44}{221 * R_a * C * f} = 220\text{nF}$$

come verifica f_{max} con $R_b = R_{bmin}$

$$f_{max} = \frac{1,44}{21 * R_a * C} = 207\text{Hz}$$

Nell'oscillatore di range ($0.5 \div 5\text{Hz}$) :

$$C = \frac{1,44}{21 * R_a * C * f} = \frac{1,44}{21 * (R_a * C)} = 10$$

Avendo scelto di lavorare con il primo oscillatore a 1Hz e con il secondo a 100Hz possiamo ricavare il valore delle due resistenze variabili da imporre nei rispettivi trimmer

Per il segnale portante il trimmer va regolato a:

$$R_{b2} = \frac{1,44}{f * C} - R_a - R_{b1} = 17\text{k}\Omega$$

Per il segnale modulante il trimmer va regolato a:

$$R_{b2} = \frac{1,44}{f * C} - R_a - R_{b1} = 56,2\text{k}\Omega$$

4.4 Stadio di ingresso

Lo stadio di ingresso si propone di acquisire i segnali provenienti dall'esterno tramite cavo BNC. Dovendo fare un AND tra il segnale di ingresso e la forma d'onda generata dal 556, è superfluo inserire un ulteriore stadio di separazione per acquisire i segnali dalla porta di ingresso, in quanto le specifiche tecniche della porta logica mostrano una resistenza di ingresso molto elevata (tecnologia bipolare). E' dunque sufficiente effettuare i collegamenti illustrati in figura per ottenere una modulazione di ampiezza ad impulsi del segnale analogico che rappresenta con continuità la Hue del colore.

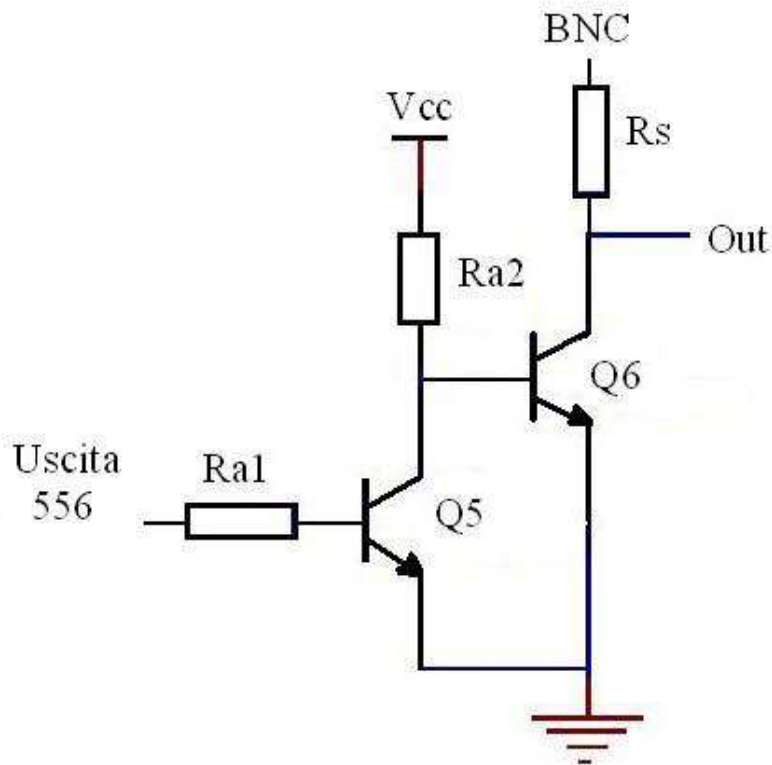


Figura 4.8: And logico - stadio d'ingresso

Anche il funzionamento di questo stadio è semplice: il BNC è collegato all'ingresso positivo del buffer che non assorbe corrente; è dunque

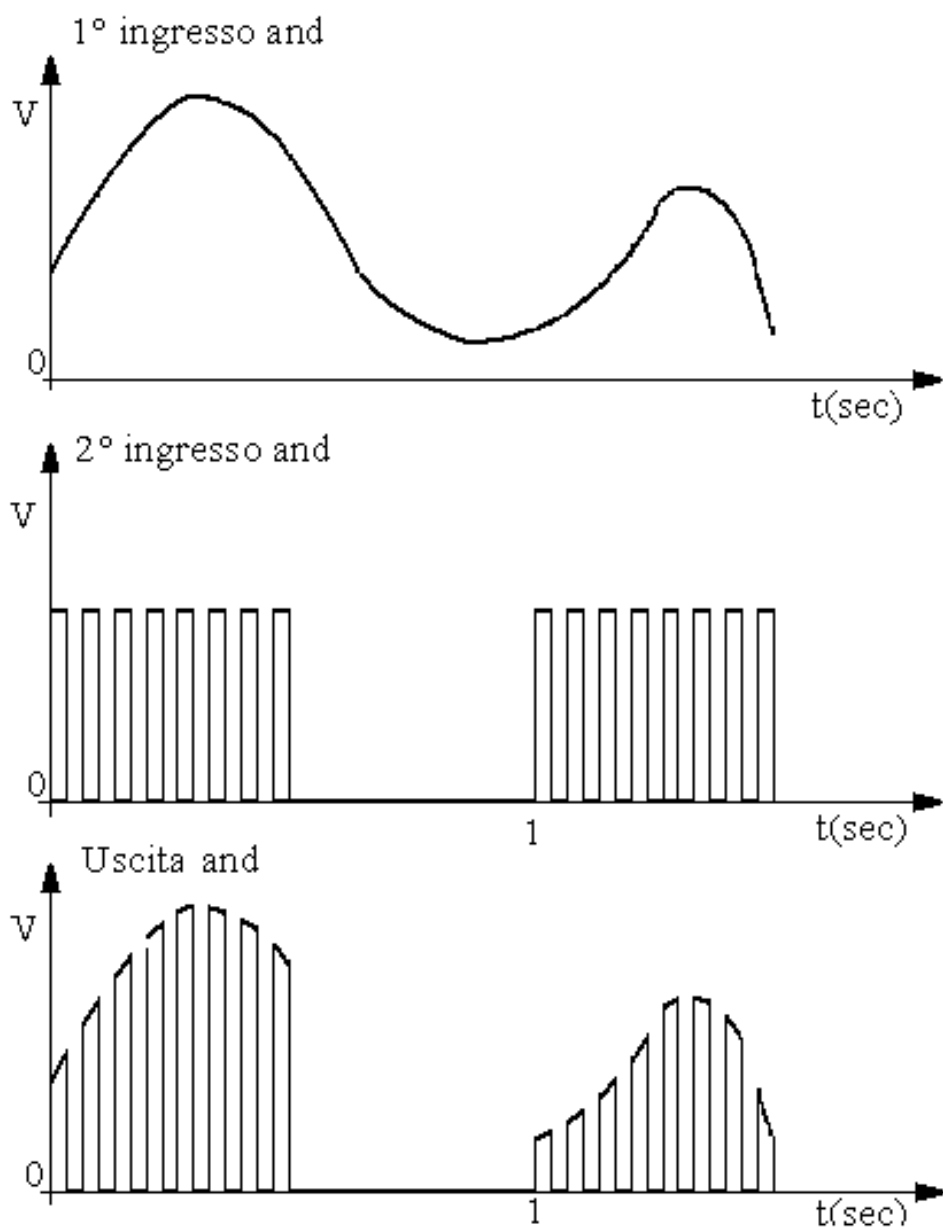


Figura 4.9: Forme d'onda relative alla modulazione in ampiezza operata dall'and sul segnale esterno

possibile propagare l'informazione rappresentata dalla tensione esterna nel pin 2 solo quando la corrente che attraversa la resistenza R_s ha il cammino aperto verso massa, ovvero attraverso il transistor npn Q_6 . Esso può condurre verso massa solo se sulla sua base c'è una $V_{be} > V_{tn}$. La sua base però è collegata al collettore di Q_5 , il quale ha una V_c alta solo se la sua base è sopra soglia. Quest'ultima è logicamente collegata all'uscita dell'oscillatore e quindi sarà attiva solo nei semiperiodi alti. Il risultato allora è la modulazione in ampiezza del segnale analogico in ingresso all'operazionale.

4.5 Driver

4.5.1 Buffer

Si utilizza, all'uscita del modulatore di ampiezza, uno stadio separatore per assorbire la minima corrente possibile dal convertitore, come illustrato nella sezione precedente. Lo stadio separatore è costituito da un amplificatore operazionale con il segnale di ingresso sul terminale positivo e la retroazione dell'uscita sul terminale negativo. Vengono poi applicate due capacità da 100 pF per garantire la stabilità di funzionamento dell'operazionale. L'alimentazione è in tensione positiva +15V e negativa -15V. Lo schema è illustrato in figura.

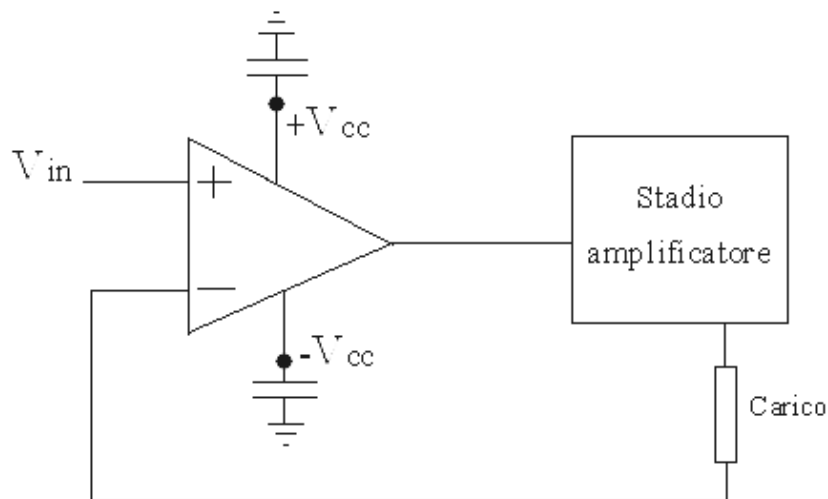


Figura 4.10: Stadio separatore ad elevata impedenza d'ingresso

4.5.2 Stadio amplificatore di uscita

Lo stadio di uscita è costituito da un darlington BD680 inserito in configurazione a collettore comune. In parallelo al carico rappresentato dall'SD180 è posizionato un diodo la cui funzione è quella di assorbire la corrente nelle fasi negative, corrente che danneggerebbe l'induttore presente all'interno dell'SD180. Lo stadio di uscita è preceduto dallo stadio separatore appena descritto.

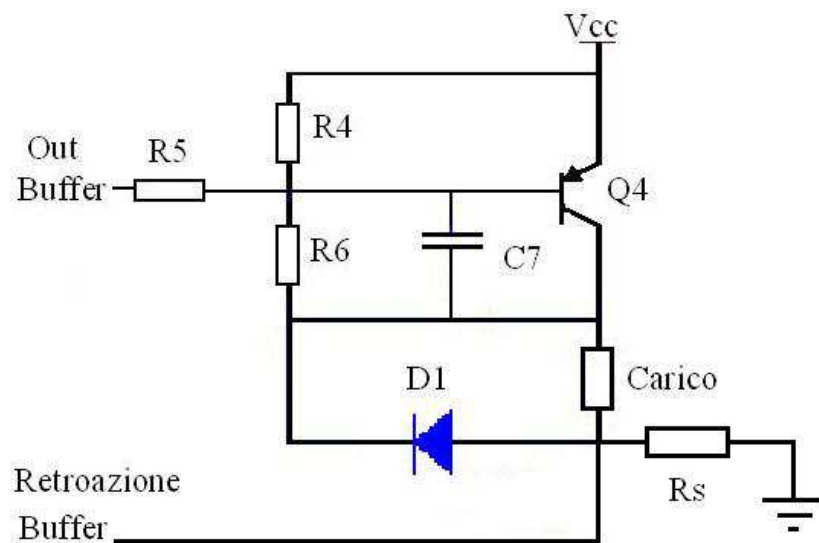


Figura 4.11: Stadio amplificatore d'uscita

4.5.3 Calcolo dei valori delle correnti

Per azionare l'SD180 è necessario portare ai suoi capi una tensione minima di 12 Volt. In queste condizioni si ha una tensione $V_{ce} = 3$ V che fa operare il darlington in saturazione. In questa regione di funzionamento si ottiene una $I_c = 1.5$ A. Di conseguenza la corrente di base è 2 mA. possiamo quindi calcolarci il valore della resistenza R_5 necessario al corretto funzionamento del transistor in queste condizioni:

$$R_5 = \frac{V_{in} - V_B}{I_B} = \frac{22 - 12}{0.002} = \frac{10}{0.002} = 5000\Omega$$

Quando invece V_{in} è bassa la tensione ai capi della giunzione base-emettitore non è in ogni caso sufficiente a superare la soglia di accensione, la V_{out} è 0 e non c'è corrente in uscita.

Si deve scegliere inoltre una resistenza base collettore R_e adeguata: il suo valore deve essere abbastanza alto per non consumare inutilmente corrente: un valore adeguato è 150 K Ω . In questo modo la corrente che la attraversa è limitata a $V_{bc}/150000$, che nel caso peggiore ($I_e=0$), raggiunge l'intensità di 0,5 mA. Con la V_{in} alta, invece, la corrente si attesta intorno ai 3 μ A, valore del tutto trascurabile rispetto all'assorbimento di corrente del carico.

4.6 Schema completo

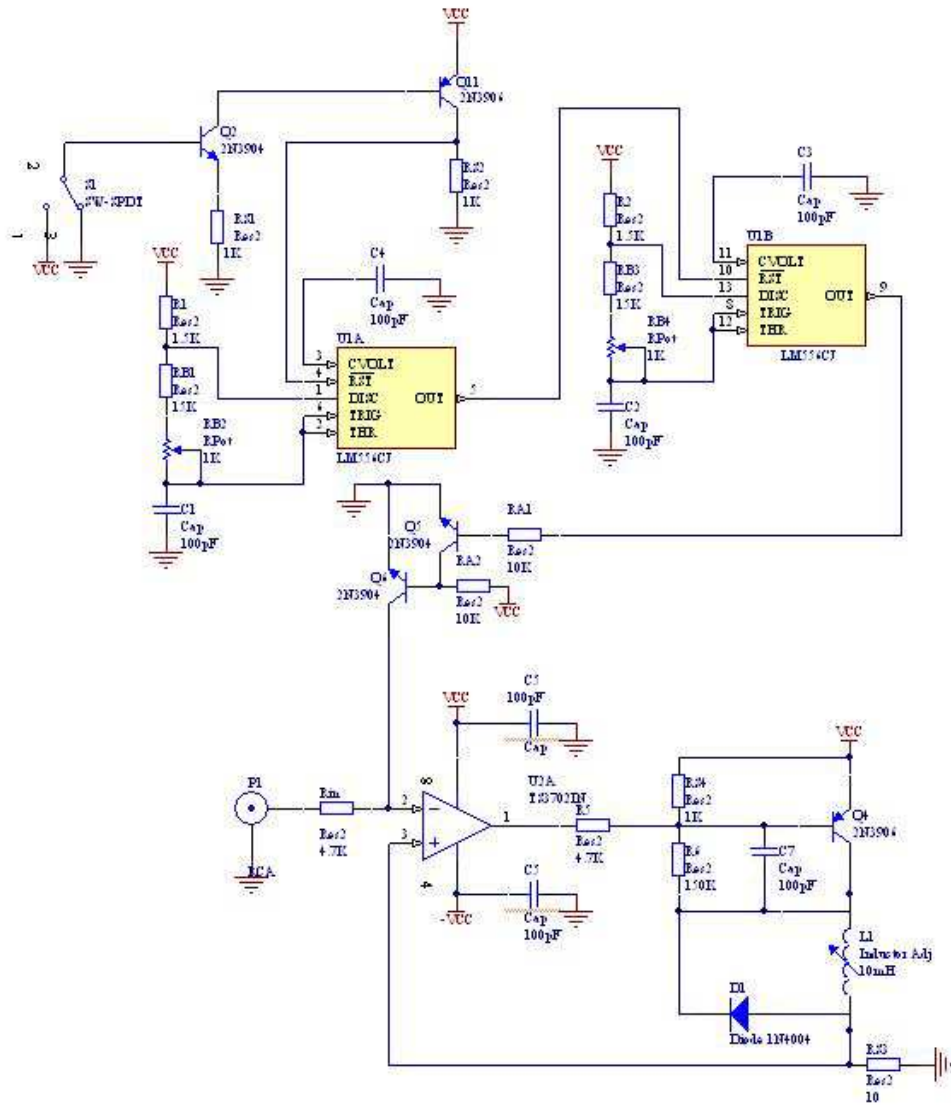


Figura 4.12: Schema completo del circuito elettronico

4.7 Realizzazione PCboard

Piuttosto che ricorrere a un cablaggio point to point per la realizzazione del circuito, si è preferito procedere alla progettazione in CAD di un PC-board con il programma DXP2004. Il primo passo è stata la realizzazione dello schema del circuito, con le relative istanze dei componenti, alcuni appartenenti alle stesse librerie del DXP e altre create appositamente.

Dopo il superamento dei test sulla correttezza dei collegamenti si è passati al layout vero e proprio. Si è scelto per semplicità di lavorare su due livelli di metallizzazione, top e bottom e due tipi di piste; da 30 mil per l'alimentazione e la massa e 25 mil per i collegamenti interni. Il supporto è dato da una scheda di dimensioni 16cm x 11cm su cui sono state replicati tre circuiti identici.

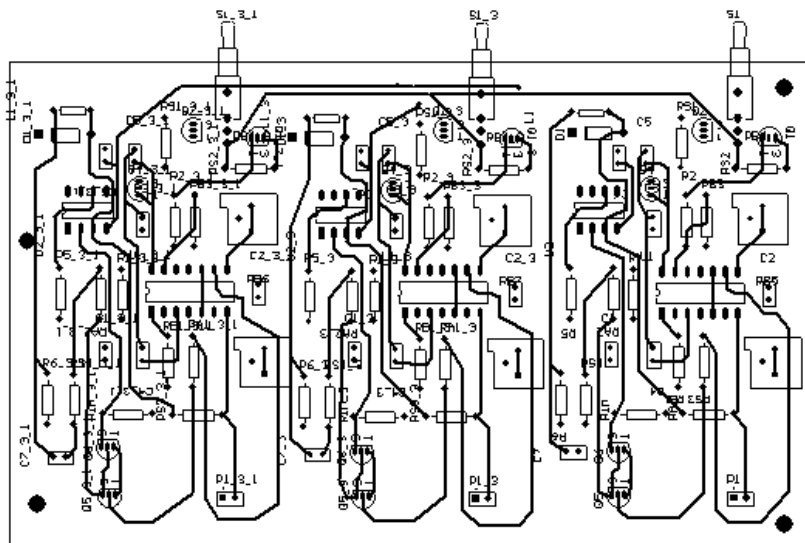


Figura 4.13: layout del top layer del pcb

Terminata la fase di layout con le relative procedure di autorouting e conseguente check, si è stampato con una stampante laser il master sui lucidi.

Il master viene impresso mediante una lampada Ultra Vida Lux sul-

la scheda. Il pcb una volta presensibilizzato viene immerso in una soluzione di percloruro ferrico che rimuove dalla scheda tutto il rame tranne quello ricoperto dal master. Infine tutti i componenti vengono montati e assemblati sulla scheda.

Conclusioni

Abbiamo elaborato una proposta di resa tattile del colore come possibile alternativa del sistema di trasduzione tattile del colore per videolesi, precedentemente concepito nell'ambito del progetto VIDET. Il trasduttore qui realizzato, avendo in ingresso un segnale rappresentante la hue del colore è in grado di trasformarlo in vibrazioni meccaniche. L'utente, opportunamente informato, saprà poi istintivamente maneggiare il nostro dispositivo per interfacciarsi con l'ambiente circostante. Resta da affrontare la parte software del progetto; in particolar modo dovrà essere elaborato un programma in grado di gestire la scheda.
