



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

La percezione dei sapori nella realtà virtuale

Relatore: Prof. Gianfranco Santovito

Laureando: Marco Filippino

ANNO ACCADEMICO 2021– 2022.

Data di laurea 20 luglio 2022

È come se, indossando gli occhiali che ci proiettano nei mondi nuovi che solamente somigliano a quello cui abbiamo creduto fino ad ora, ma che sono sempre diversi, prendessero forma vivente le intuizioni platoniche sulla dimensione illusoria delle percezioni, e la dialettica freudiana fra i contenuti di sogno e veglia.

— Alessandro Cecchi Paone —

Dedicato alla mia famiglia e agli amici che mi hanno sostenuto in questo percorso, per me così pieno di momenti importanti alle volte difficili.

Sommario

Con il presente documento si vuole cercare di dare una visione delle potenzialità di un dispositivo correlato alla realtà virtuale (VR) in grado di far percepire i sapori trasmessi mediante stimoli elettrici e termici. Molte persone danno il senso del gusto per scontato, ma il disturbo del gusto può avere un effetto negativo sulla salute e sulla qualità della vita. Ogni anno, più di 200.000 persone vanno da un medico per problemi con la loro capacità di percepire i gusti o gli odori. Gli scienziati affermano che fino al 15% degli adulti può avere problemi con il proprio gusto, ma non cercano assistenza medica. La percezione del gusto fantasma è il disturbo del gusto più comune. Spesso ha un sapore sgradevole anche se non c'è niente in bocca. Durante la lettura di questo testo si vedrà come variazioni di temperatura e di corrente in determinati range permettano di stimolare sapori specifici. In particolare si vedrà che saranno proprio le rapide variazioni di temperatura e corrente a permettere tale percezione. Tale tecnologia potrebbe sviluppare un'utilità di due generi. Il primo consiste nel fatto che risulta possibile stimolare la percezione dei sapori senza la stimolazione di recettori chimici, ma mediante recettori termici. Il secondo invece, specifica che aumentare la temperatura porta a sensazioni più intense dei sapori dolci. Questo può quindi contribuire ad alleviare il disagio di quei pazienti che soffrono di disfagia, incapaci di ingerire cibo, garantendogli comunque la possibilità di gustare qualcosa che gli dia piacere senza compromettere la cura; aiutare a comprendere meglio quei casi di diagnosi di malattie come l'ageusia o la disgeusia.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	La fisiologia	1
1.1.1	Sensi speciali	2
1.1.2	Trasmissione	4
1.1.3	Multisensorialità	7
1.2	Realtà Virtuale	8
1.2.1	Storia	8
1.2.2	Dispositivi e sensi	10
2	Gusto virtuale	11
2.1	Stimolo e percezione	12
2.2	La psicofisica del gusto	13
3	Dispositivo del gusto virtuale	17
3.1	Produzione degli stimoli	18
3.1.1	Caratterizzazione dei sapori da stimolazione termica	20
3.1.2	Incremento del sapore dolce con la stimolazione termica	24
3.1.3	Come gli incrementi di temperatura influenzano il sapore dolce	25
4	Risposta cerebrale alle stimolazioni	27
4.1	L'EEG e la stimolazione magnetica evidenziano	27
4.2	La fMRI in combinazione con l'EMG e la stimolazione termica	29
5	Applicazioni e prospettive future	35
5.1	Medico-Patologiche	35
5.2	Ricreative	36
6	Bibliografia	37

Capitolo 1

Introduzione

Pensiamo a quante volte ci siamo riuniti con i nostri cari e amici per condividere momenti belli, ma anche brutti per percepire un supporto o per darlo a nostra volta. Adesso invece pensiamo a questi ultimi anni durante i quali per via della pandemia del virus SARS-CoV-2 siamo dovuti rimanere distanti dalle persone a cui teniamo. Abbiamo sperimentato l'isolamento, la distanza oltre che l'impotenza della perdita e di conseguenza del poter condividere attimi durante i quali eravamo soliti scambiare emozioni e sensazioni. Proprio le sensazioni e le emozioni sono ciò di cui si discuterà in queste poche pagine, però saranno sensazioni con un'accezione un po' diversa. Parleremo di sensazioni fisiche che il corpo umano percepisce mediante i cosiddetti organi di senso, andando a culminare sulla percezione del gusto e come questa possa essere stimolata mediante specifici strumenti, al punto da essere stimolata virtualmente, così da rendere ancora più immersiva l'esperienza (**Fig. 1.1**) che un soggetto ha quando si avvicina alla VR.



Figura 1.1: I cinque sensi coinvolti in una totale immersività, Immagine di Gianni Rosa Gallina [1].

1.1 La fisiologia

In fisiologia è possibile distinguere due categorie di sensi, si parla di sensi somatici riferendosi a quei sensi come tatto-pressione, temperatura, dolore, e propriocezione; poi ci sono i sensi speciali come vista, udito, olfatto, equilibrio e gusto, i quali si trovano concentrati a livello della testa (**Fig. 1.2**).

Tutti questi sensi differiscono nei meccanismi della ricezione, però sono accomunati da tre caratteristiche: (1) uno stimolo fisico, una forma di energia, in grado di essere percepita da un recettore sensoriale; (2) una serie di eventi attraverso i quali lo stimolo viene trasformato

in impulsi nervosi; e (3) una risposta a questo segnale sotto forma di percezione o esperienza cosciente della sensazione. Il recettore prende quindi il ruolo di trasduttore, che converte lo stimolo in un segnale intracellulare, di solito è una variazione del potenziale di membrana.

Alcuni stimoli raggiungono la corteccia cerebrale dove sono percepiti in modo cosciente, altri invece determinano una risposta senza che se ne abbia coscienza. Tutti i sistemi sensoriali, quando vengono stimolati, ritrasmettono segnali concernenti quattro attributi di base delle informazioni inerenti lo stimolo, cioè la modalità, la sede, l'intensità ed il decorso temporale [2].

I quattro attributi dell'esperienza sensoriale sono codificati da sottogruppi specifici di neuroni del sistema nervoso centrale.

La modalità definisce una classe generale di stimoli sulla base del tipo di energia che essi trasmettono. I recettori, assieme alle vie centrali con le quali sono connessi ed alle aree cerebrali alle quali proiettano, compongono i sistemi sensoriali e l'attività nervosa a livello di ciascun sistema genera tipi specifici di sensazioni.

La sede dello stimolo è rappresentata dall'insieme dei recettori di un sistema sensoriale che vengono attivati. All'interno di ogni organo di senso i recettori sono distribuiti in modo topografico, per cui la loro attività segnala non solo la modalità dello stimolo ma anche la sua posizione nello spazio e le sue dimensioni.

L'intensità dello stimolo viene segnalata dall'ampiezza della risposta di ogni recettore, che è in rapporto con l'ammontare complessivo dell'energia dello stimolo liberata a livello del recettore stesso.

Il decorso temporale dello stimolo viene definito dall'inizio e dalla fine della risposta del recettore e dipende dalla velocità con cui l'energia dello stimolo comincia ad essere efficace e cessa di esserlo a livello del recettore. Perciò, sia l'intensità che il decorso temporale dello stimolo sono rappresentati dalle proprietà di scarica dei neuroni sensoriali attivati.

L'essere umano possiede quattro classi di recettori, ciascuna delle quali è sensibile principalmente ad una sola forma di energia dello stimolo: meccanica, chimica, termica od elettromagnetica.

I meccanocettori del sistema somatosensitivo mediano il senso del tatto, le sensazioni propriocettive ed il senso della posizione delle articolazioni, i meccanocettori dell'orecchio mediano l'udito ed il senso di equilibrio.

I chemocettori sono implicati nel senso di dolore, prurito, gusto ed olfatto.

I termocettori della cute rilevano la temperatura corporea e di ciò che gli viene a contatto.

L'unico recettore sensibile all'energia elettromagnetica è rappresentato dai fotorecettori della retina [3].

1.1.1 Sensi speciali

I cinque sensi speciali possiedono i recettori più specializzati.

L'udito assieme all'equilibrio sono i sensi che si manifestano a livello dell'orecchio. Nello specifico l'equilibrio è controllato dal complesso vestibolare dell'orecchio interno, le parti restanti dell'orecchio servono per l'udito.

L'udito rappresenta la percezione dell'energia delle onde sonore; il suono è l'interpretazione di frequenza, ampiezza e durata delle onde sonore che giungono al nostro orecchio. In tutto questo il cervello ha il compito di trasdurre la frequenza delle onde sonore nell'altezza del suono. La trasduzione del suono è un processo a più fasi.

1. Percussione della membrana timpanica

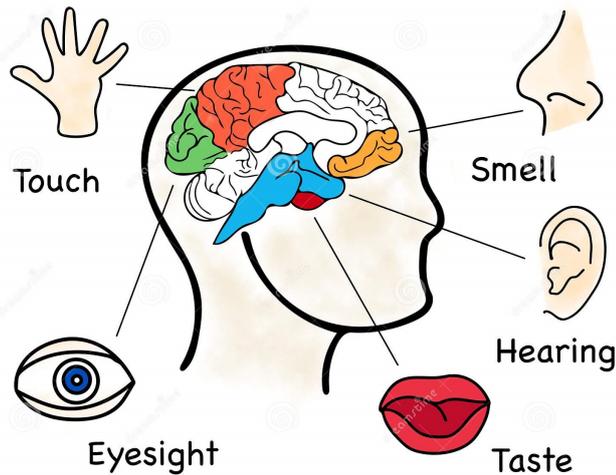


Figura 1.2: I cinque sensi.

2. Trasferimento dell'energia ai tre ossicini dell'orecchio medio che vibrano
3. Vibrazione che crea onde di pressione sulla perilinfa (fluido presente nella coclea)
4. Le onde di pressione spingendo sulla membrana cocleare fanno piegare le cellule cigliate.
5. Comportando l'apertura di canali ionici che a loro volta portano alla creazione di un segnale elettrico che stimola il rilascio del neurotrasmettitore, questo porta alla generazione di potenziali d'azione che si propagano verso l'encefalo.

L'equilibrio è uno stato di bilanciamento. Esso ha due componenti: una che ci informa sui nostri movimenti nello spazio, e una statica, che ci permette di capire se la testa non è nella normale posizione eretta. Il senso dell'equilibrio dipende dalle cellule cigliate che si trovano nell'apparato vestibolare dell'orecchio interno.

Le cellule cigliate trasducono il movimento delle loro ciglia con lo stesso principio di quelle della coclea, con la differenza che sono le accelerazioni a comportare un loro movimento.

La visione è un processo attraverso il quale la luce, riflessa dagli oggetti presenti nell'ambiente, viene trasformata in immagine mentale. Tale processo può essere suddiviso in tre fasi:

1. La luce entra nell'occhio e viene messa a fuoco sulla retina dal cristallino.
2. I fotorecettori della retina trasducono il segnale luminoso in segnale elettrico.
3. I segnali elettrici vengono elaborati attraverso le vie nervose che collegano la retina al cervello.

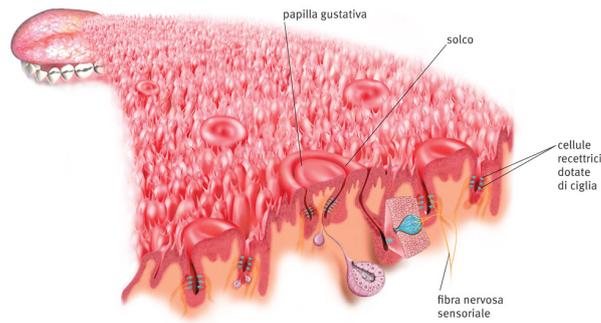


Figura 1.3: Conformazione della lingua [4].

L'olfatto ci permette di discriminare tra migliaia di odori diversi. Il sistema olfattivo umano è formato da un epitelio olfattivo situato nella cavità nasale; esso incorpora neuroni sensoriali primari chiamati cellule olfattive.

I neuroni sensoriali olfattivi sono cellule bipolari. Dal polo apicale di ciascun neurone nasce un unico dendrite, il quale raggiunge la superficie dell'epitelio. Il polo basale invece dà origine a un unico assone che attraversa lo strato osseo che sovrasta la cavità nasale e stabilisce contatti sinaptici con i neuroni del bulbo olfattivo.

La lingua, l'organo di senso specializzato nella percezione del gusto.

La lingua è composta da circa 10.000 gemme gustative (**Fig. 1.3**). In ogni gemma gustativa ci sono quattro tipi di cellule morfologicamente distinte: cellule basali, cellule scure, cellule chiare e cellule intermedie. Le ultime tre sono anche dette cellule gustative di tipo I, II e III.

Nell'uomo, le gemme gustative sono localizzate nella mucosa di epiglottide, palato e faringe, e nelle pareti delle papille della lingua.

Le fibre nervose afferenti, provenienti dalle gemme gustative dei due terzi anteriori della lingua viaggiano nella corda del timpano; quelle provenienti dal terzo posteriore raggiungono il tronco cerebrale con il nervo glossofaringeo (**Fig. 1.4**). Le fibre gustative provenienti da aree diverse dalla lingua (per esempio, dalla faringe) raggiungono il tronco cerebrale con il nervo vago.

L'uomo distingue cinque sapori fondamentali: dolce, acido, amaro, salato e umami. Si era abituati a pensare che esistessero aree particolari sulla superficie della lingua per ciascuna delle prima quattro sensazioni gustative, ma ora è chiaro che tutte le sostanze che stimolano la sensazione gustativa sono percepite da tutte le parti della lingua, con zone che percepiscono più intensamente certi sapori rispetto ad altri e delle strutture adiacenti [5].

Per far sì che venga percepito uno stimolo è necessario che venga superata una soglia di eccitazione. Lo stimolo può essere:

1. elettrico
2. chimico
3. meccanico
4. (termico)

1.1.2 Trasmissione

Come sappiamo il corpo umano è costituito da cellule capaci di trasferire l'informazione a seguito di una stimolazione. Possono quindi essere prodotti due tipi di modificazioni chimico-fisiche: -potenziali locali; i quali in base alla sede, si distinguono in potenziali sinaptici, generatori o

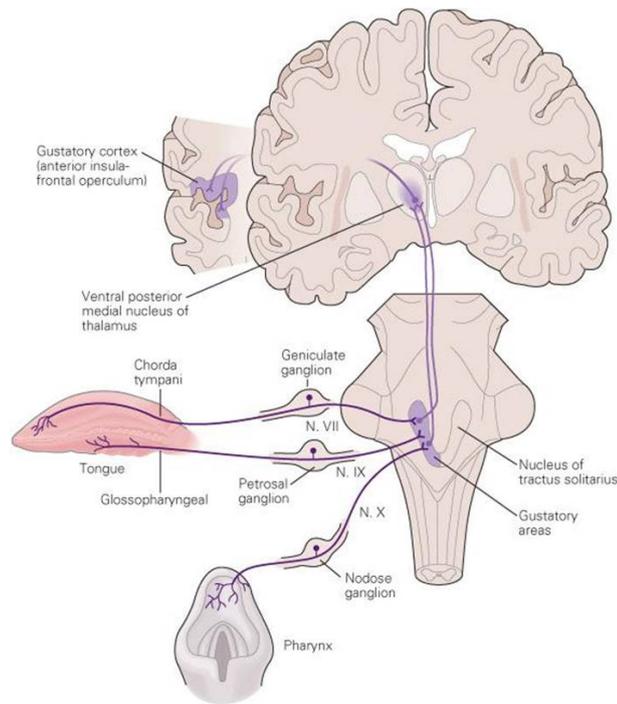


Figura 1.4: Vie nervose del gusto [5].

elettrotonici;

-potenziali d'azione che comportano la propagazione del segnale attraverso cambiamenti nella conduttanza ionica. Questi ultimi sono il principale linguaggio del sistema nervoso.

L'impulso viene normalmente trasmesso lungo l'assone fino alla sua terminazione. Gli eventi elettrici nei nervi sono rapidi, misurabili in millisecondi, e le variazioni di potenziale sono piccole e vengono misurate in millivolt; la conduzione degli impulsi nervosi è molto più lenta di quella dell'elettricità che avviene passivamente.

La conduzione nella fibra nervosa è, infatti, un processo attivo, autopropagato, e l'impulso si muove lungo la fibra nervosa con velocità ed ampiezza costanti [3]. Durante il potenziale d'azione, come pure durante i potenziali elettrotonici e la risposta locale, la soglia del neurone agli stimoli cambia. Le risposte iperpolarizzanti innalzano il potenziale, mentre quelle depolarizzanti l'abbassano portandolo più vicino al livello di soglia. Questa depolarizzazione elettrotonica fa sì che inizi una risposta locale a seguito della quale, raggiunto il livello critico, si genera un potenziale d'azione che a sua volta depolarizza elettrotonicamente la membrana a valle (**Fig. 1.5**).

I potenziali d'azione hanno luogo quando i canali ionici voltaggio-dipendenti si aprono, alterando la permeabilità di membrana agli ioni Na^+ e K^+ .

L'equazione di Nernst (1.1) permette di determinare la differenza di potenziale ai capi di una membrana permeabile quando è in equilibrio elettrochimico, questo permette di comprendere cosa accade a livello delle membrane cellulari, ma solo se si considerasse lo scambio di un unico ione [6].

$$E = E^o - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[A]}{[A^{n-}]} \quad (1.1)$$

Si rende necessario chiarire che nei sistemi viventi, sono molteplici gli ioni che contribuiscono al potenziale d'azione, ecco quindi che risulta utile considerare un'altra equazione: l'equazione di Goldman-Hodgkin-Katz (GHK) (1.2).

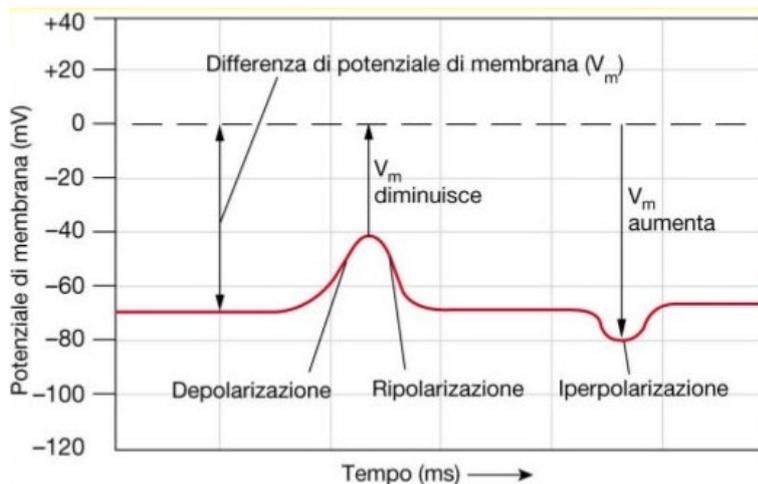


Figura 1.5: Grafico del potenziale d'azione [3].

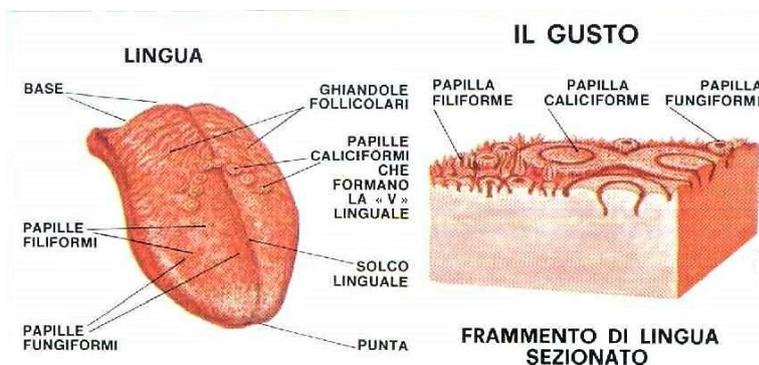


Figura 1.6: Papille gustative (immagine modificata) [7].

$$E = RT/F \ln \frac{P_K [K^+]_o + P_{Na} [Na^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i}{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o} \quad (1.2)$$

Come abbiamo detto in precedenza, relativamente al gusto l'uomo distingue cinque sapori fondamentali. I recettori per il gusto sono illustrati in **Figura 1.6**. Il sapore salato provocato da NaCl è mediato da un canale selettivo per Na^+ . L'ingresso di Na^+ nei recettori depolarizza la membrana, generando il potenziale di recettore. Il sapore acido è prodotto dai protoni (ioni H^+). Il sapore umami è dovuto all'attivazione, nelle gemme gustative, di una forma troncata di un recettore metabotropo del glutammato, mGluR4. Il sapore amaro è prodotto da una serie di molecole diverse. Molti recettori legati alle proteine G sono recettori gustativi e stimolati da sostanze con gusto amaro. Anche sostanze che hanno un gusto dolce agiscono attraverso la proteina G eterotrimerica gustducina (**Fig. 1.7**).

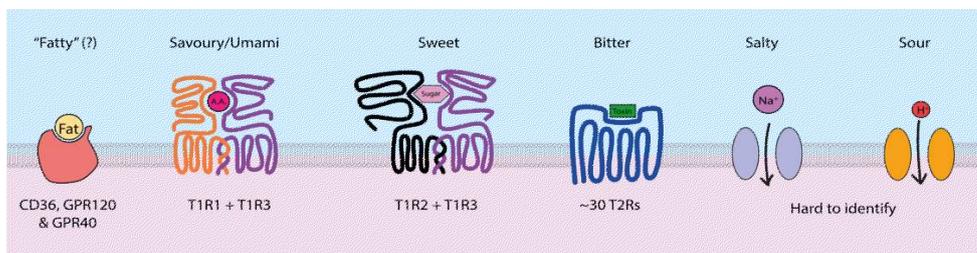


Figura 1.7: Trasduzione del segnale nei recettori gustativi [5], (modificata).

Sia i recettori che rispondono all'amaro che quelli che rispondono al dolce agiscono tramite il metabolismo dei nucleotidi ciclici e degli inositol-fosfati che stimolano la depolarizzazione.

1.1.3 Multisensorialità

La capacità multisensoriale che il nostro corpo mette in atto durante l'arco di tutta la nostra vita risulta essere un aspetto basilare per poter effettuare un'analisi del contesto in cui viviamo, ponendo l'attenzione su informazioni, provenienti da diverse fonti, in grado di influenzare le scelte che prendiamo. Essa si riconosce in processi che includono l'identificazione del bersaglio, il rilevamento del segnale, la comprensione del linguaggio, il movimento spaziale, e la percezione dei sapori. I vantaggi adattativi che l'integrazione multisensoriale conferisce sono importanti per la sopravvivenza, con l'effettiva acquisizione dell'uso dell'informazione multisensoriale che rende possibile la generazione di appropriati comportamenti in risposta a determinate circostanze per le quali un singolo senso sarebbe insufficiente [8]. La percezione dei gusti si verifica quando un cibo o una bevanda entra nella bocca. Sebbene la percezione risulti dipendente da molteplici modalità sensoriali, risulta come percezione di un'unica esperienza sensoriale. Si sostiene che un meccanismo di legame nell'area della bocca somatomotoria della corteccia riunisce gusto, tatto e olfatto in un registro spaziale comune e facilita la loro percezione come un unico senso in modo coerente. Quando assaporiamo del cibo o una bevanda nella nostra bocca lo tocchiamo e percepiamo anche il suo odore attraverso la via olfattiva retronasale (**Fig. 1.8**). Con il termine "sapore" riusciamo a descrivere questa esperienza multimodale. Il senso del gusto come già detto in precedenza è riferito alle sensazioni di dolce, salato, amaro, acido e umami. Poiché i recettori del gusto si trovano fianco a fianco nella cavità orale con termocettori, meccanocettori e nocicettori, tutto ciò che viene assaggiato induce sensazioni tattili e termiche, e talvolta anche sensazioni chemestetiche. Sebbene il gusto e l'estetica orale forniscano informazioni critiche sulla natura fisico-chimica degli elementi ingeriti, è la componente olfattiva del cibo ad essere necessaria per l'identificazione del sapore. In sintesi, la percezione del sapore dipende da più stimoli distinti che interagiscono a diversi livelli nel sistema nervoso centrale.

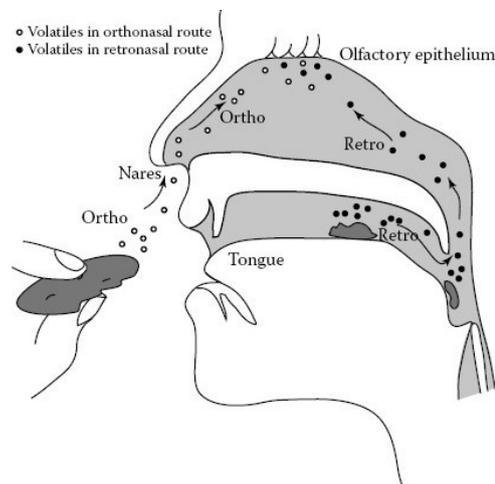


Figura 1.8: Orthonasal vs. retronasal olfaction [8].

1.2 Realtà Virtuale

Il protagonista del film *Ready Player One* di Steven Spielberg tratto dall'omonimo libro di Ernest Cline definisce la Realtà Virtuale (da ora in avanti indicata con l'acronimo VR) come un luogo in cui: "Si può fare tutto, essere chiunque, senza andare da nessuna parte". Effettivamente per VR si intende la possibilità di entrare in un mondo verosimile, perciò esistente, almeno per il fatto di rispondere esattamente a tutte le leggi della fisica.

La VR è innanzitutto un'esperienza percettiva ed è per questo che oggi si tende a confondere la VR con ciò che potrebbe definirsi un suo "surrogato". Quando guardiamo uno schermo, abbiamo la testa fissa, ciò che si muove sono gli occhi. Se la nostra concentrazione ci ha permesso di prendere per vere quelle che erano solo immagini significa che in quel momento la nostra realtà consisteva in quello che lo schermo proiettava, regalandoci le emozioni che avremmo potuto provare trovandoci veramente nel luogo del filmato. Lo scopo è quello di creare un miglior modo di comunicare.

Un sistema virtuale presuppone la presenza di un computer, il quale mediante l'utilizzo di un programma adeguato e di strumenti particolari ad esso collegati sia in grado di elaborare e rispondere correttamente a tre funzioni principali: la percezione, il controllo e la risposta [9].

1.2.1 Storia

Prima di arrivare a parlare della storia della VR vera e propria è necessario considerare che per raggiungere il livello tecnologico necessario al suo sviluppo si è partiti dalla con la prima macchina per il calcolo, l'abaco. Successivamente, nella storia dell'umanità, si sono susseguite diverse macchine una più innovativa dell'altra, passando per la *Difference Engine* di C.Babbage (1822), le schede perforate primi dispositivi programmabili, di H.Hollerith e J.Powers (1890). Questa continua evoluzione proseguì senza sosta portando di volta in volta l'uomo sempre più vicino al mondo virtuale.

La VR cominciò a concretizzarsi durante gli anni compresi tra 1955 e il 1962. L'idea di volersi connettere a un mondo virtuale esisteva già da prima, ma solo in quel periodo sono cominciati i primi tentativi pratici, ecco il motivo per cui viene considerato come periodo della vera nascita, esso però rappresenta meglio il periodo in cui sono stati prodotti i primi strumenti tra questi si ricord Sensorama (**Fig.1.9**) e con essi sono state vissute le prime esperienze.

Il Sensorama era una macchina creata per il cosiddetto "cinema d'esperienza". Morton Heilig

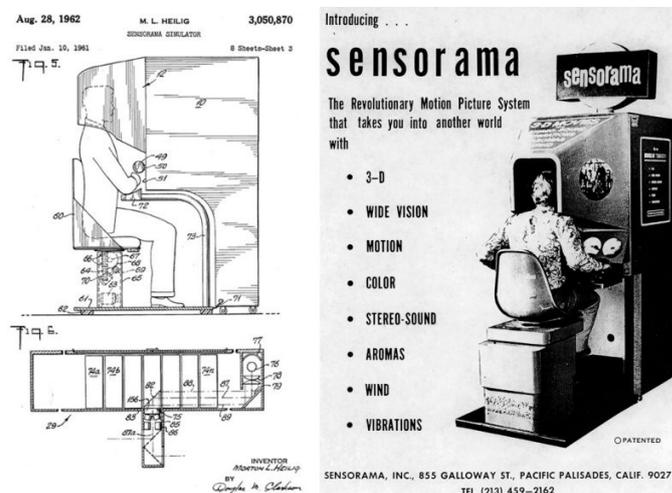


Figura 1.9: Heilig e il suo Sensorama [10].

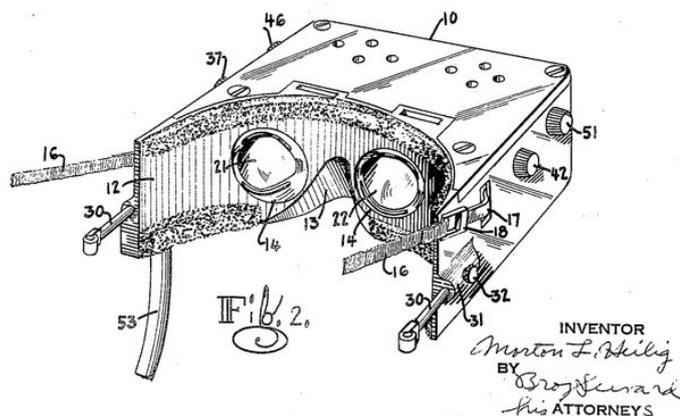


Figura 1.10: Apparato stereoscopico-televisivo per uso individuale [12].



Figura 1.11: Uno dei primi *DataGlove* [13].

realizzò questa cabina in cui, oltre alla vista e all'udito, venivano stimolati anche i sensi di olfatto e tatto. Era presente, infatti, un tunnel del vento e un sistema di emissione di fragranze [11].

Il visionario Heilig non aveva in serbo soltanto il Sensorama. Tra i suoi progetti c'era anche un visore (**Fig.1.10**) [12], la cui uscita avvenne nel 1960, incredibilmente simile a quelli attuali. Negli anni successivi si continuò lo sviluppo di queste tecnologie, anche se non mancarono periodi di interruzione, dovuti principalmente ai costi della tecnologia, oltre che alla sua forma ancora acerba per la gestione di sistemi avanzati. Proseguendo, nel 1982, vennero presentati per la prima volta da *Atari*, i *DataGlove*, sviluppati da Zimmerman, che consistevano in guanti capaci di convertire i movimenti della mano in segnali elettrici trasmessi attraverso le fibre ottiche (**Fig. 1.11**).

Negli anni successivi ci fu un continuo sviluppo nel settore che vide una piattaforma, il *Virtuality 1000CS*, nel 1991, come una delle innovazioni più significative. Solo negli ultimi anni, però si è finalmente raggiunto uno sviluppo tecnologico tale da permettere un'elaborazione dei dati sufficientemente elevata per poter gestire il carico di informazioni comportato da un insieme di dispositivi.



Figura 1.12: *Oculus-Rift-S 1o.*

1.2.2 Dispositivi e sensi

Attualmente in commercio sono diffusi dispositivi come *Oculus Rift S* (**Fig. 1.12**), con dei joystick per il movimento durante l'immersione del soggetto nel mondo virtuale.

Ma come funzionano i dispositivi per la VR?

Abbiamo già accennato alla potenzialità immersiva che i dispositivi per la VR ci concedono di sfruttare. Cerchiamo di capire come questo sia possibile.

Vista: la fantastica riproduzione iper-dettagliata e stereoscopica realizzata con un ampio campo visivo è composta da oggetti perfettamente riprodotti dal vero grazie a foto ad alta definizione e panoramiche, oppure, è la riproduzione di oggetti esistenti o inesistenti creati da 3D artist.

Udito: oltre al campo visivo viene anche stimolato l'udito, grazie a cuffie che riproducono il cosiddetto audio 3D, ovvero un audio che non solo tiene conto del bilanciamento destro/sinistro e davanti/dietro, ma riesce anche a creare situazioni di profondità e di distanza, avvicinamento o allontanamento.

Movimento: la VR non è una evoluzione della TV, come si potrebbe pensare. Due aspetti separano la seconda dalla prima, portando a forme di coinvolgimento emotivo del tutto nuove: la totale libertà di visione e soprattutto la libertà di movimento all'interno degli ambienti. Questo è possibile grazie ad un particolare tracciamento dei movimenti operato dal visore, denominato *motion tracking* e suddivisibile in:

1. *Eye tracking*: misurazione dei movimenti degli occhi mediante una microcamera posta all'interno del visore.
2. *Body tracking*: osservazione del movimento del visore attraverso sensori infrarossi e fotocellule.
3. *Head tracking*: tracciamento dei movimenti della testa in base a un principio chiamato *6 Degrees Of Freedom* ovvero l'abilità di movimento all'interno dello spazio tridimensionale.

([14]) "Montagna, 2022".

Ci si chiede se esista un mezzo capace di comunicare davvero in modo universale. Esiste cioè un mezzo che non necessita né di esperienza, né di conoscenza per comunicare?

A queste domande è facile poter rispondere con la Realtà Virtuale però se si considera il concetto di comunicazione universale, dal punto di vista del corpo umano abbiamo visto come nella storia, si sono susseguiti diversi dispositivi. I più sviluppati rimangono incentrati sul senso della vista e dell'udito, a seguire ci sono i guanti, per la trasmissione dello stimolo tattile. Abbiamo inoltre visto Sensorama, il quale presentava già meccanismi in grado di stimolare anche l'olfatto. Quindi possiamo aspettarci che sia possibile comunicare anche stimoli relativi al senso del gusto. Proveremo nelle pagine seguenti a dare una prospettiva di come sia possibile tale trasmissione.

Capitolo 2

Gusto virtuale

In precedenza, abbiamo potuto vedere il dispositivo chiamato Sensorama, sviluppato negli anni '60. Più di recente è stato sviluppato un altro dispositivo, il *Virtual cocoon* (2009) (**Fig. 2.1**). È un casco per la VR che permette di stimolare tutti e cinque i sensi consentendo di provare esperienze simili a quelle vissute nel mondo reale. Esso presenta un tubo collegato ad una scatola dalla quale viene rilasciata una combinazione di sostanze chimiche per permettere di percepire gli odori ed anche i gusti quando vengono direttamente spruzzate in bocca. Tutto questo però comporta una limitazione dei movimenti del soggetto, oltre al fatto che quella che si genera non è una vera e propria attivazione del senso del gusto in modo digitale.

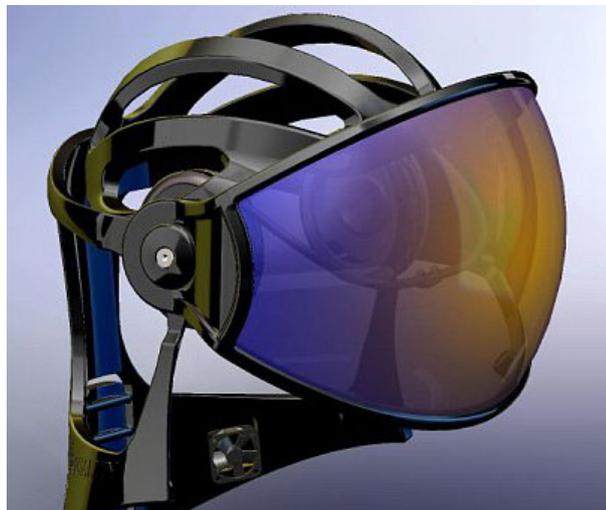


Figura 2.1: Virtual cocoon, dispositivo multisensoriale [15].

A seguito di diversi esperimenti si è arrivati quindi a produrre uno stimolo a livello gustativo mediante degli impulsi elettrici. Il fatto di far circolare o interrompere il passaggio di corrente sulla lingua rende relativamente semplice il controllo del gusto. Il gusto può inoltre essere influenzato anche mediante stimoli termici nella bocca e nell'area circostante, attraverso questi stimoli è possibile generare sensazioni gustative. Grazie a ripetute sperimentazioni si sono raccolti degli intervalli in cui far variare le correnti e le temperature in modo da stimolare precise sensazioni gustative; possiamo vedere le relazioni che intercorrono tra i suddetti range e i sapori specifici qui di seguito (**Fig. 2.2**).

Sour: magnitude of current from 60uA to 180uA & increasing temperature from 20C to 30C

Salty: magnitude of current up to 50uA (lower frequencies)

Bitter: magnitude of current between 60uA - 140uA (bottom surface of the tongue)

Sweet: when the current is inverted & increase temperature up to 35C and continuously decrease from 35C to 25C (during the transition – continuous exposure is required)

Mint: decrease temperature from 22C to 19C

Spicy: increase temperature from 33C to 38C

Figura 2.2: Intervalli di correnti e temperature associati ai singoli sapori [1].

2.1 Stimolo e percezione

Lo stimolo è definito come un agente esterno o interno capace di provocare la reazione di un sistema eccitabile: il relativo organo sensoriale (in **Figura 2.3** possiamo vedere un'esempio di cellula recettiva del gusto). Esso è sempre di natura: meccanica, chimica e/o fisica e diventa sensoriale dopo che è stato interpretato dal sistema nervoso centrale.

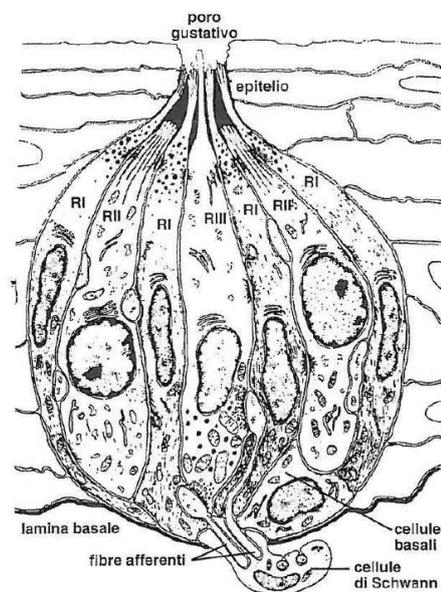


Figura 2.3: Bottone gustativo di un mammifero [6].

La percezione in senso filosofico generale, viene intesa come l'atto del prendere coscienza di qualcosa, mentre per la psicologia essa sarà intesa prevalentemente come l'elaborazione di dati sensoriali. Risulta necessario chiarire la differenza tra i termini sensazione e percezione. In genere si parla di sensazione in relazione ad eventi mentali suscitati da stimoli relativamente semplici. La percezione, al contrario, consiste nella funzione psicologica che interpreta i dati sensoriali

al fine di conferire a questi una configurazione dotata di significato. Il processo percettivo ci consente di sperimentare il mondo che ci circonda. Attraverso di esso otteniamo informazioni sulle proprietà e gli elementi dell'ambiente che sono fondamentali per la nostra sopravvivenza. La percezione non solo crea la nostra esperienza del mondo che ci circonda ma ci permette di agire nel nostro ambiente.

Importanti sono le percezioni trigemine, ovvero le sensazioni meccaniche, termiche e dolorifiche che si sommano agli stimoli del gusto e dell'olfatto. Per esempio, la capsaicina, contenuta nei peperoncini, agisce sui recettori termici generando la percezione di "piccante". Lo stesso vale per la sensazione di "fresco" causata dal mentolo che interagisce con i recettori termici degli apparati gustativo e olfattivo ([1] [16]).

2.2 La psicofisica del gusto

La psicofisica è lo studio di metodi quantitativi per valutare le relazioni fra le variabili fisiche (gli stimoli) e le corrispondenti variabili psicologiche (le percezioni), perciò permette di investigare quanto di uno stimolo siamo in grado di identificare e come riusciamo a distinguerli tra loro mediante il nostro sistema sensoriale.

Uno dei pionieri di questo campo fu Gustav Fechner, egli cominciò i suoi studi basandosi su una serie di osservazioni espresse dal fisiologo Ernst Weber a cui dobbiamo l'omonima legge (2.1). Tale legge definisce la sensibilità, ovvero la capacità di rilevare la differenza tra due stimoli. In particolare, Weber asserisce che la sensibilità al variare dell'intensità dello stimolo non risulta costante, ma invece è inversamente proporzionale all'intensità dello stimolo applicato.

$$\frac{\Delta I}{I} = k \quad (2.1)$$

Fechner si occupò dello studio di diversi metodi per misurare quantitativamente le relazioni tra stimoli e percezione. Tra tali metodi si ricordano il metodo dei limiti, il metodo degli aggiustamenti e il metodo degli stimoli costanti; essi vengono usati per misurare la soglia assoluta o la più piccola quantità rilevabile di uno stimolo.

Il metodo dei limiti consiste nell'imporre degli stimoli con un ordine crescente o decrescente per valutare quando la persona sottoposta a tali stimoli li riconosce. È utile per ottenere una rapida stima della soglia di interesse. Il metodo degli aggiustamenti invece permette all'osservatore di regolare direttamente l'intensità dello stimolo di modo da definire il range massimo dell'intensità. Il metodo degli stimoli costanti infine presenta gli stimoli in un ordine casuale, viene presentato uno stimolo di una certa intensità e il soggetto deve riferire se ha avvertito o meno la sensazione. Infine, viene considerato come soglia assoluta il valore dello stimolo che nel 50% dei casi ha la probabilità di suscitare la sensazione corrispondente.

Questi studi hanno quindi permesso di comprendere che non tutti gli stimoli sono in grado di determinare l'attivazione dei nostri sensi. In particolare, la concentrazione sufficiente a stimolare i recettori gustativi e ad indurre la relativa sensazione è detta soglia protopatica, la quale è inferiore alla concentrazione a cui il sapore viene riconosciuto con certezza, definita soglia epicritica. È interessante notare che il sapore di una sostanza può essere definito diversamente in base alla concentrazione. Prendiamo come esempio il sale (NaCl) che in piccole concentrazioni viene percepito come dolce, mentre ad elevata concentrazione come amarognolo.

La soglia gustativa è in generale più bassa per il sapore amaro, questo anche relativamente alla funzione di monitoraggio della presenza di sostanze potenzialmente tossiche. Inoltre, le soglie gustative presentano differenze legate al sesso. In generale, le donne presentano una maggiore sensibilità rispetto agli uomini per stimoli dolci e salati, e una sensibilità minore per stimoli acidi.

La relazione tra stimoli e percezione è ben espressa dalla legge di *Weber-Fechner*, nella quale si può notare come tale relazione è di tipo logaritmico (2.2); dove p indica la percezione, S l'intensità degli stimoli e k è un fattore di scala.

$$p = k \ln \frac{dS}{S} \quad (2.2)$$

Questa legge definisce perciò che all'aumentare degli stimoli, i quali vanno a sommarsi tra loro, si ha che la percezione aumenta fino a raggiungere un valore limite andando così a saturare i recettori e ottenendo quindi un grafico come quello in **Fig.2.4**.

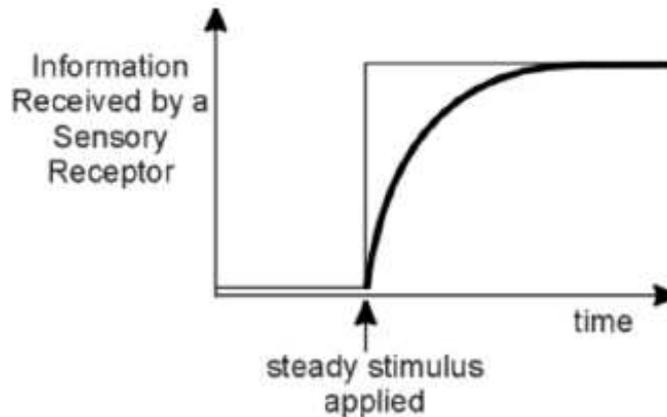


Figura 2.4: Grafico di uno stimolo applicato ad un recettore sensoriale [17].

Come abbiamo visto in precedenza, risulta molto importante per il gusto anche la temperatura, in quanto può influenzare l'intensità del sapore e di conseguenza anche la percezione [17]. Si può quindi distinguere l'intensità percepita in funzione della temperatura, nella **Figura 2.5** possiamo vedere il confronto tra la percezione durante un processo di stimolazione termica e durante un processo di stimolazione chimica.

In tale grafico, inoltre, le percezioni vengono anche distinte in base alla zona che viene posta sotto stimolazione.

Si può notare come mediante una stimolazione termica su delle specifiche zone della lingua la percezione rimane quasi inalterata, mentre in altre la percezione varia anche di molto; questo permette di ottenere quelli che sono i range di stimolazione termica adatti a modulare la percezione dei singoli sapori nelle diverse aree [18].

Ulteriori esperimenti, condotti variando la temperatura in un range compreso tra i 20°C e i 35°C, hanno permesso di stimolare gusti come il mentolo e il piccante che, come accennato in precedenza, sono sapori specificamente percepiti dai recettori termici: in particolare, raffreddando da 35°C a 20°C è possibile percepire il gusto della menta, mentre riscaldando dai 20°C ai 35°C si percepisce il sapore piccante (**Fig.2.6**).

Attraverso altri esperimenti invece si è riscontrato come variando la corrente si possa intensificare o ridurre la percezione dei sapori, in particolare all'aumentare della corrente si ha un intensificarsi dei sapori (**Fig.2.7**), al contrario, invece, modificazioni della frequenza degli impulsi non comporta variazioni nella percezione del gusto.

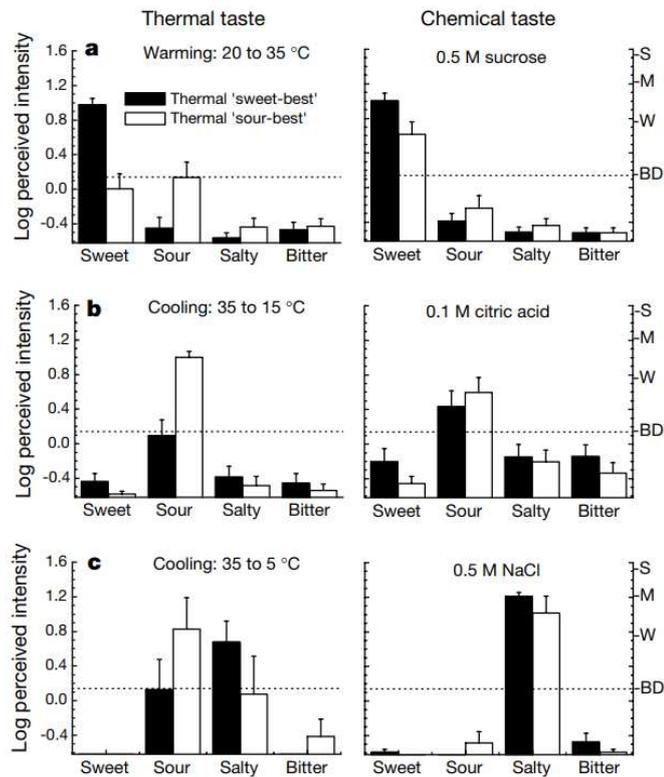


Figura 2.5: Confronto tra stimoli termici e stimoli chimici. Inoltre, si distingue tra le diverse zone della lingua quale sia il sapore che viene percepito con intensità maggiore [18].

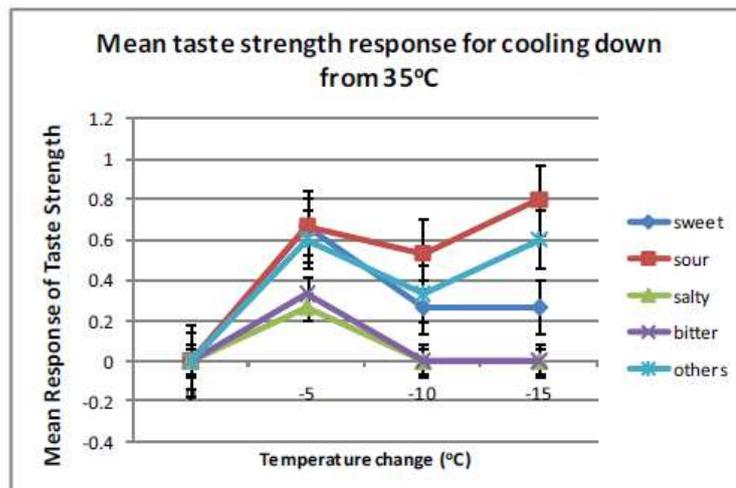


Figura 2.6: Grafico che riporta come i sapori vengono influenzati dalla temperatura (20-35 °C) [19].

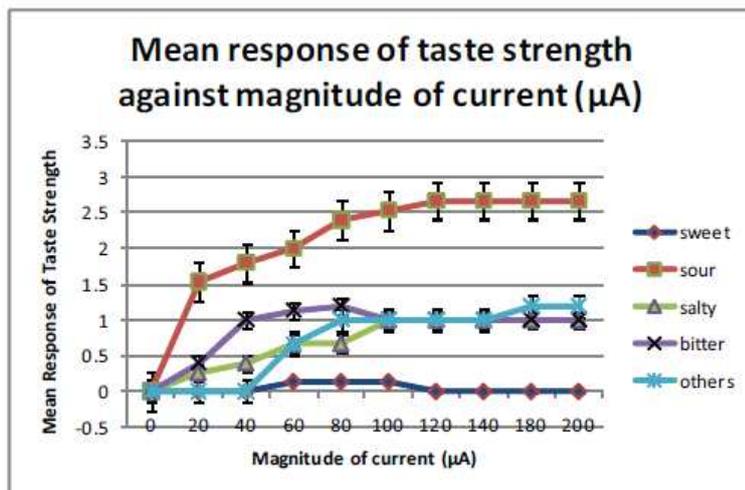


Figura 2.7: Grafico che riporta come i sapori vengono influenzati dalla corrente (20-200 μA) [19].

Capitolo 3

Dispositivo del gusto virtuale

Il dispositivo per il gusto digitale consiste di tre sottosistemi principali (**Fig 3.1**), il modulo per la stimolazione elettrica, il modulo per la stimolazione termica e il modulo dell'interfaccia con la lingua. Il modulo per la stimolazione elettrica, schematizzato in **Figura 3.2** trasmette piccoli impulsi di corrente mediante l'elettrodo d'argento. Similmente, il modulo per la stimolazione termica, presentato mediante un diagramma a blocchi in **Figura 3.3** controlla la temperatura usando una cella di Peltier e mediante l'elettrodo d'argento; nei primi esperimenti fu utilizzato un elettrodo di rame, ma successivamente a causa di un migliore coefficiente termico da parte dell'argento si è deciso di sfruttare questo, consentendo una più rapida variazione di temperatura. Ricapitolando l'interfaccia è composta dall'elettrodo d'argento, dalla cella di Peltier, da un termistore e da un piccolo dissipatore di calore (**Figg. 3.4 e 3.5**).

L'elettrodo d'argento ha la funzione di trasmettere sia l'impulso elettrico, sia la temperatura. Il modulo di Peltier viene sfruttato per il meccanismo di funzionamento che permette di variare rapidamente la temperatura da caldo a freddo e viceversa.

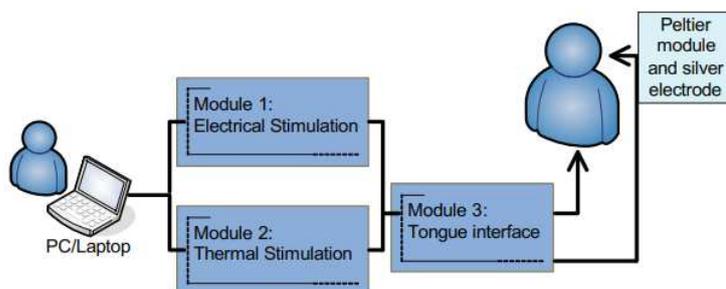


Figura 3.1: Architettura del dispositivo per il gusto digitale [19].

Il sistema per il controllo elettrico produce impulsi a onde quadre sull'elettrodo d'argento con una corrente di intensità compresa tra 0-200 μA con una frequenza in un intervallo compreso tra 50Hz e 1000Hz [19]. La lingua esercita un'impedenza, la quale varia da persona a persona in relazione alla densità delle papille gustative presenti sulla superficie. Per ovviare a questo problema si è preferito porre una sorgente a corrente costante per tutti i partecipanti agli esperimenti **Fig.3.2**.

Il sistema per il controllo termico, come abbiamo visto è costituito da un modulo di Peltier, per controllarlo si è sfruttata una tecnica di modulazione a impulsi (PWM). Per riuscire ad ottenere in uscita la temperatura desiderata si è implementato, su un microcontrollore, un algoritmo per il controllo proporzionale-integrale (PI). L'uscita del microcontrollore viene utilizzato come ingresso del blocco PWM che gestisce il modulo di Peltier (**Fig. 3.3**).

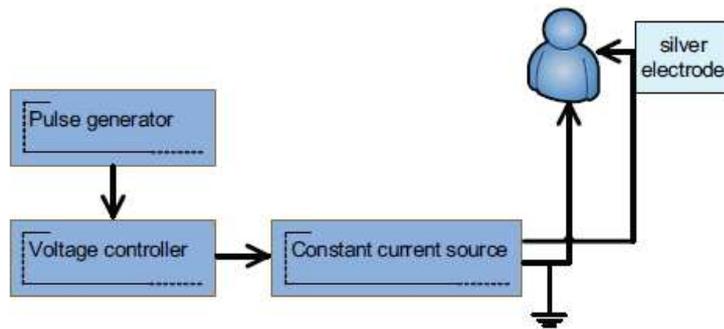


Figura 3.2: Diagramma a blocchi del sistema per l'elettrostimolazione [19].

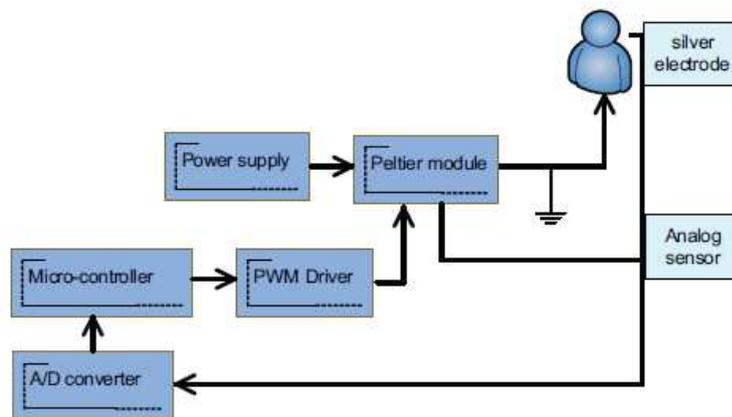


Figura 3.3: Diagramma a blocchi del sistema per la termostimolazione [19].

3.1 Produzione degli stimoli

L'approccio di stimolazione termoelettrica della lingua per indurre la percezione di sapori è stato studiato dal Dr. Nimesha Ranasinghe del Mixed Reality Lab (MXR) presso l'Università Nazionale di Singapore. Chiunque da bambino giocando con delle batterie si sarà accorto della sensazione di acido, percepita ponendo sulla lingua i due terminali della batteria da 9V.

Il Dr. Ranasinghe decise quindi di studiare la stimolazione elettrica combinandola con una stimolazione termica, anch'essa nota per alterare la percezione del gusto. Egli sviluppò un'interfaccia che consente entrambe le stimolazioni (Fig. 3.4)

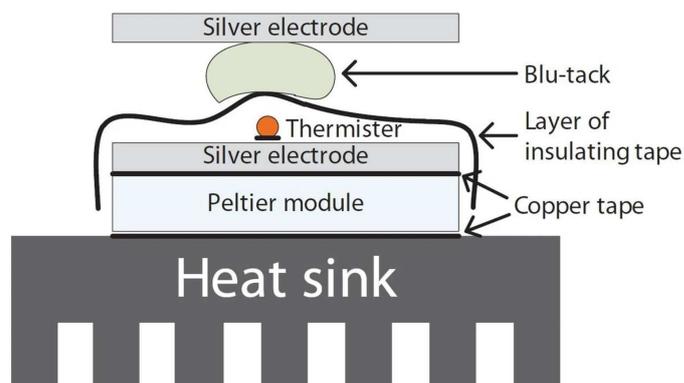


Figura 3.4: Schema dell'interfaccia per la stimolazione della lingua [20].

Come possiamo vedere in **Figura 2.2** sono stati definiti i valori delle correnti e delle temperature per i quali è possibile percepire i singoli sapori. Per controllare il dispositivo ci si è serviti di un computer usando un *client software* come *Putty* o *hyperterminal*.

Gli utenti possono facilmente sfruttare l'interfaccia seriale (USB) di cui il dispositivo è dotato (**Fig. 3.5**) per programmare il dispositivo e controllare le funzionalità come l'aumento o la diminuzione di temperatura e anche gli intervalli di stimolazione [19]. In **Figura 3.6** è rappresentato un esempio di schema elettrico della scheda di controllo degli stimoli termici della lingua.

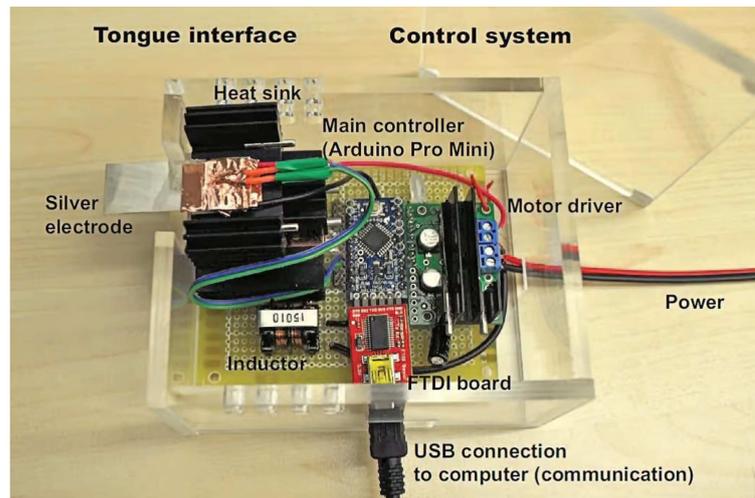


Figura 3.5: Dispositivo per la stimolazione della lingua [20].

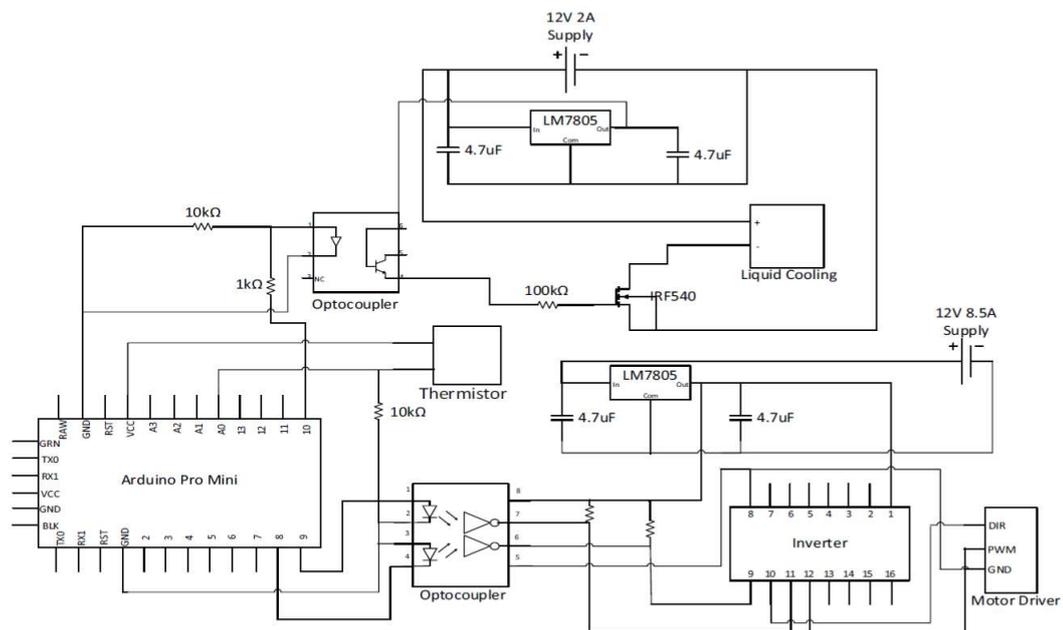


Figura 3.6: Schema circuitale del dispositivo per la stimolazione termica della lingua [19].

Per determinare quali fossero i range di temperature e corrente necessari a stimolare un determinato sapore, il gruppo di ricercatori dell'Università di Londra, guidato da Adrian D. Cheok, fece tre diversi esperimenti. Possiamo vedere nei grafici presenti in **Figura 3.7** come nel primo siano stati determinati inizialmente i valori minimo e massimo raggiungibili dal dispositivo corrispondenti rispettivamente a 4 °C di minimo e 100°C di massimo; anche se il modulo di

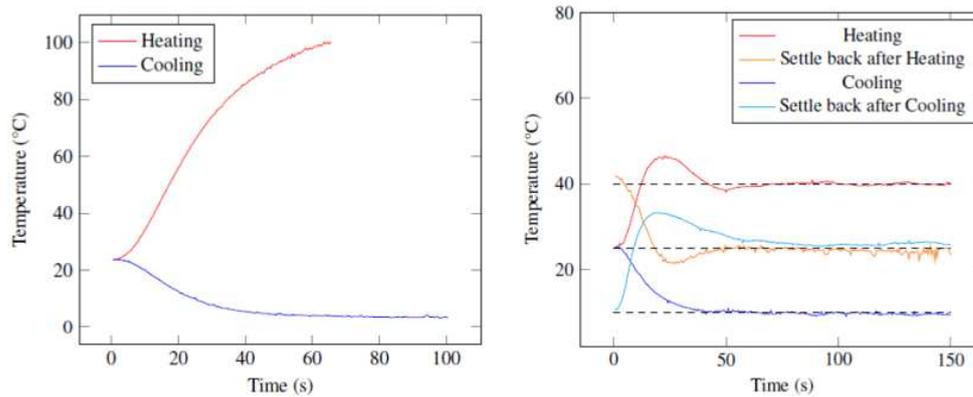


Figura 3.7: Il primo grafico presenta le temperature minima e massima ottenute quando il dispositivo funziona alla massima PWM. Il secondo grafico invece mostra le curve di stimolazione gestite mediante un controllore PID quando la temperatura varia negli intervalli 10-25 °C e 25-40°C [19].

Peltier potesse raggiungere i -40°C non si è considerato necessario scendere oltre la soglia dei 4 °C. Questo è di fondamentale importanza per la scelta del posizionamento del modulo di Peltier in quanto si è potuto sceglierne uno con una migliore efficienza per il riscaldamento perdendo di efficienza nel raffreddamento. Successivamente è stato sfruttato un controllore PID per gestire la stabilità della risposta durante le fasi di riscaldamento e di raffreddamento del dispositivo, cercando di definire quali fossero i parametri migliori per ogni fase. In particolare, nella fase di riscaldamento (per raggiungere i 40°C) sono stati identificati i seguenti parametri, $K_p=20$, $K_i=10$, $K_d=30$ considerando un tempo di salita di 6.0s. In seguito, nella fase di raffreddamento per tornare a 25 °C i parametri da impostare sono $K_p=60$, $K_i=0$, $K_d=50$. Parallelamente durante la fase di raffreddamento a 10°C sono stati impostati i parametri seguenti: $K_p=1000$, $K_i=300$, $K_d=8000$ ed infine per tornare alla temperatura di 25 °C i parametri sono $K_p=20$, $K_i=10$, $K_d=30$ (come nel primo caso). La scelta di tutti questi parametri ha permesso di identificare le curve presenti nel secondo grafico rappresentato in **Figura 3.7**, in particolare le curve di crescita e abbassamento della temperatura di colore blue e rossa rappresentano le curve di stimolazione dei partecipanti agli esperimenti, mentre la curva arancione e azzurra rappresentano le curve sfruttate per il settaggio del dispositivo per tornare alla temperatura di 25 °C. A seguito della determinazione iniziale di questi fattori si è proceduto con la sperimentazione, sono stati condotti tre esperimenti. Il primo è servito per determinare quali fossero le sensazioni riscontrate a seguito di una stimolazione termica. Il secondo è stato utile a determinare se il dispositivo per la stimolazione termica alterasse l'intensità del sapore dolce. Infine, il terzo ha permesso di capire se variazioni di differenti variazioni di temperatura incidessero sulle sensazioni percepite.

3.1.1 Caratterizzazione dei sapori da stimolazione termica

Durante il primo esperimento di Cheok [21], i partecipanti venivano fatti sedere in una stanza chiusa (**Fig. 3.8**), si è sfruttato il dispositivo per riscaldare e raffreddare la lingua dei partecipanti, si è inoltre considerato lo stato in cui il dispositivo era spento come parametro di controllo dell'esperimento. L'ordine delle stimolazioni era casuale (OFF, riscaldamento, raffreddamento) e ad ogni soggetto è stato sottoposto a 12 prove in totale (3 stimolazioni differenti X 4 prove per stimolazione) a seguito di ogni prova a ciascuno dei soggetti veniva richiesto di risciacquare la bocca con dell'acqua distillata. La procedura aveva una durata di circa un'ora per ogni partecipante. Questo primo esperimento ha permesso di determinare quali sono le percentuali

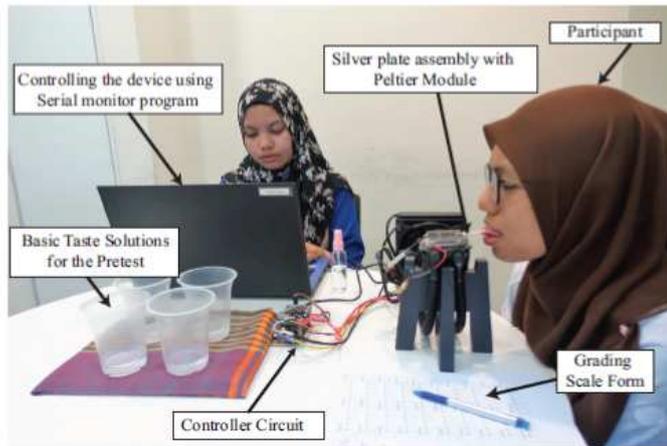


Figura 3.8: Rappresentazione della postazione di lavoro durante la sperimentazione [19].

di partecipanti che hanno riscontrato specifici sapori (**Fig. 3.9**) o sensazioni non gustative (**Fig. 3.10**) in bocca.

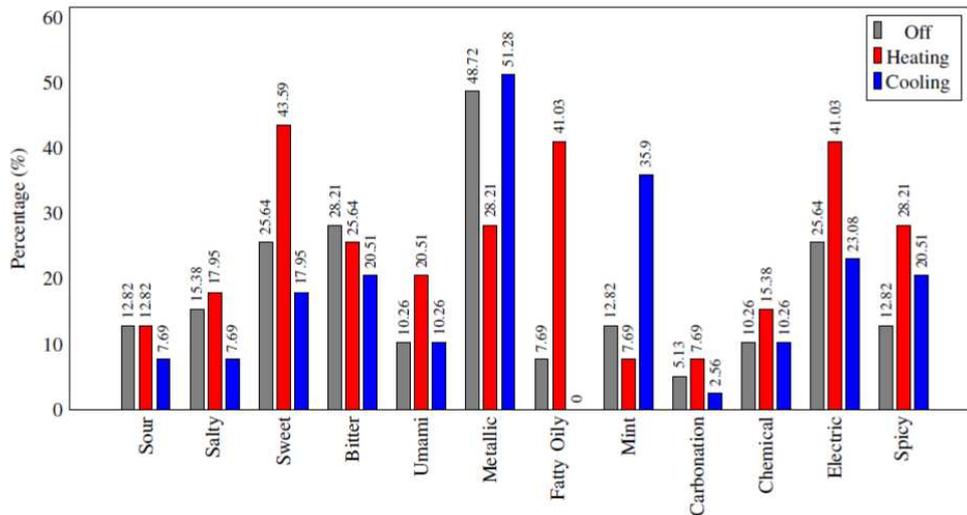


Figura 3.9: Percentuali di partecipanti che hanno riscontrato un determinato sapore [19].

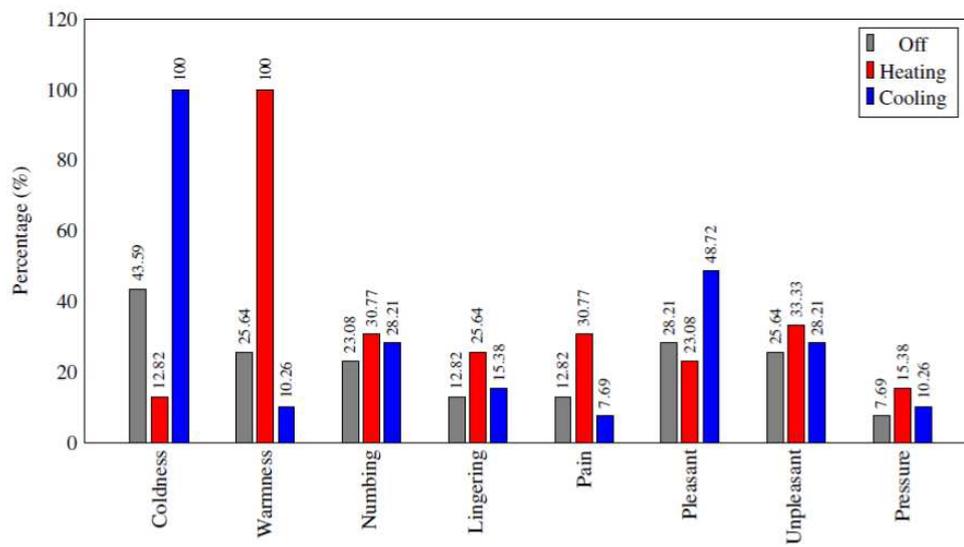


Figura 3.10: Percentuali di partecipanti che hanno riscontrato una determinata sensazione non gustativa [19].

Durante lo stesso esperimento sono stati riscontrate anche le medie delle intensità dei sapori (**Fig. 3.11**) e delle sensazioni non gustative (**Fig. 3.12**). I risultati più significativi sono quelli relativi ai sapori dolci, quelli grassi-oleosi, sapore di menta, elettrico oltre a sensazioni di calore, freddo e gradevolezza.

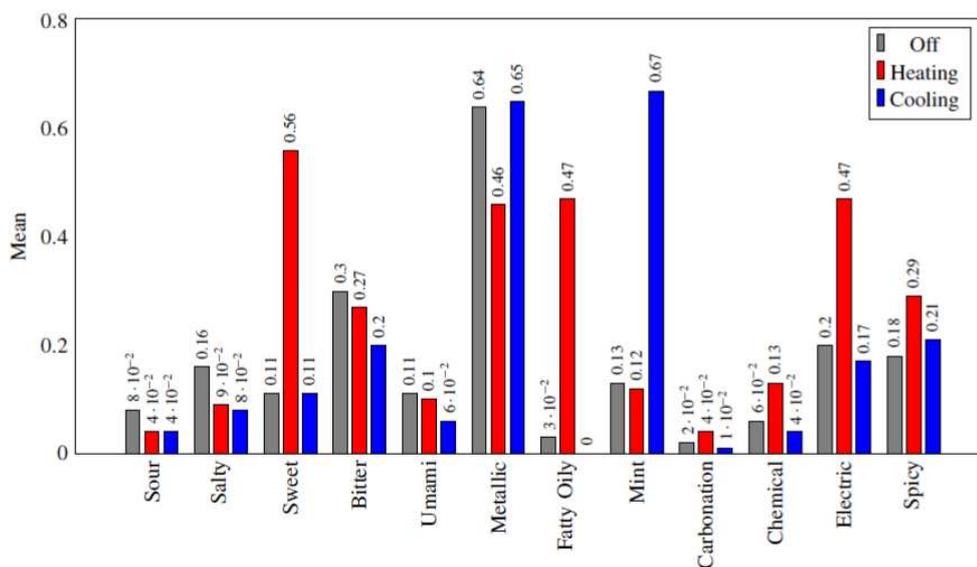


Figura 3.11: Medie delle intensità dei sapori che i partecipanti hanno riscontrato [19].

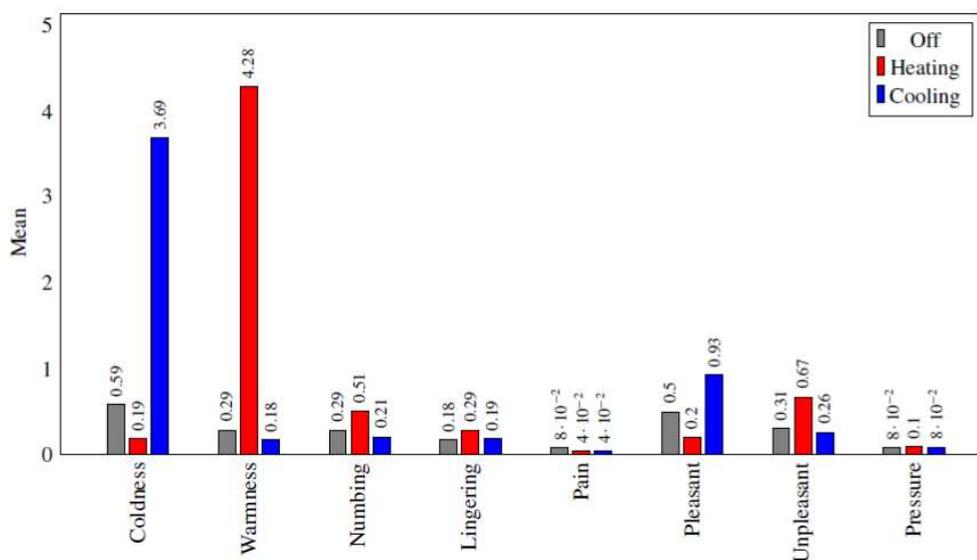


Figura 3.12: Medie delle intensità delle sensazioni non gustative che i partecipanti hanno riscontrato [19].

Questi risultati hanno dimostrato che riscaldando la lingua è possibile percepire sapori dolci, grassi-oleosi ed elettrico oltre la sensazione di calore. Mentre raffreddando si possono percepire il sapore di menta oltre alle sensazioni di freddo e gradevolezza. Confrontando questi risultati con degli esperimenti precedenti è stato possibile riscontrare che con la stimolazione termica si riesca a riprodurre l'effetto di depolarizzazione comportato dall'acido linoleico (LA) sul canale cationico TRPM5. Questo TRPM5 comporta delle variazioni nei canali voltaggio dipendenti, ed è possibile attivarlo mediante la termo-stimolazione la quale comporta voltaggi negativi.

3.1.2 Incremento del sapore dolce con la stimolazione termica

Il secondo esperimento relativo lo studio di incremento di sapore mediante la stimolazione termica si basa proprio sul meccanismo che la termo-stimolazione compie sul canale TRPM5. Ovvero, si è ipotizzato che la stimolazione termica comportasse un aumento della sensazione gustativa legata al sapore dolce. Questo esperimento si è concentrato sulla risposta gustativa provata dai partecipanti a seguito della somministrazione di tre soluzioni liquide, di cui due a diverse concentrazioni di zucchero (3,1 g/L) e (24 g/L) ed una di solo acqua. Comportando quindi sei differenti scenari relativi all'attivazione o meno del dispositivo termico. Anche in questo esperimento i partecipanti sono stati sottoposti alle prove in ordine casuale; ad ogni prova ai partecipanti era richiesto di posizionare il dispositivo sulla punta della lingua per 14s. A seguire, indipendentemente dal fatto che il dispositivo fosse acceso o spento, i soggetti dovevano assaggiare una delle tre soluzioni e valutarne intensità, dolcezza e piacere in una scala da 1 a 10, le cui medie sono state riportate in **Figura 3.13**. Sono state somministrate le soluzioni una volta per ogni condizione di funzionamento del dispositivo. Il tutto è stato condotto considerando due limitazioni. La prima limitazione era relativa a quanto rapidamente la lingua si raffreddasse a seguito della rimozione dello stimolo termico. La seconda invece riguardava il fatto che i recettori per i sapori dolci risiedono in fondo alla lingua, ovvero una zona che non veniva termostimolata. Perciò l'effetto termico era limitato.

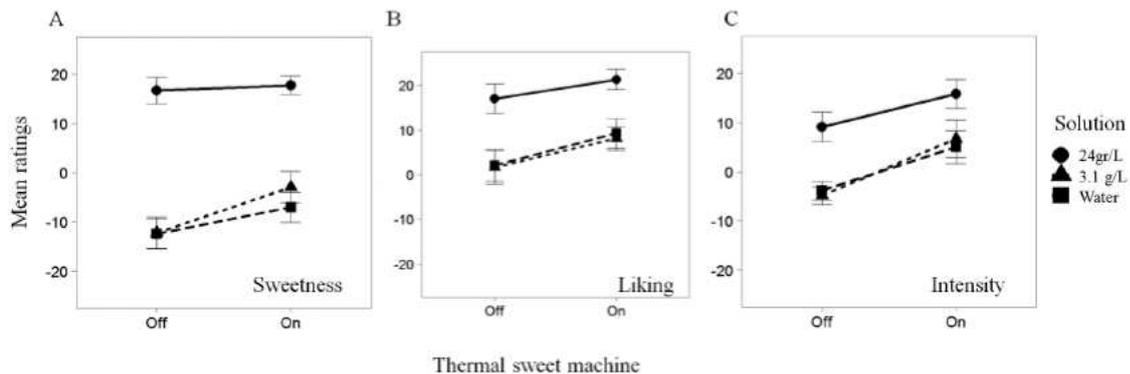


Figura 3.13: I grafici mostrano l'incremento di sapore dolce, di piacere e di intensità [19].

Questo esperimento ha permesso, ad ogni modo, di identificare che ai partecipanti piacesse maggiormente la soluzione con una concentrazione maggiore di zucchero a confronto con quella a minore concentrazione o la sola acqua. Allo stesso modo l'intensità risultava maggiore per la soluzione a maggiore concentrazione, inoltre l'intensità aumentava nel caso in cui ci fosse la stimolazione termica.

La stimolazione termica è risultata influenzare oltre l'intensità anche la dolcezza della soluzione. Ricapitolando ai partecipanti, come ci si aspettava, piaceva di più la soluzione a più alta concentrazione, oltre al fatto che questa veniva percepita con maggiore intensità e più dolce. Questi risultati mostrano quindi che questo dispositivo potrebbe essere utilizzato nella VR combinato con dolcificanti chimici.

3.1.3 Come gli incrementi di temperatura influenzano il sapore dolce

Il terzo esperimento condotto con il dispositivo termico è servito a comprendere come le variazioni di temperatura possano influenzare la sensazione gustativa del sapore dolce. L'esperimento è stato suddiviso in due parti, la prima parte consisteva nell'identificare quei soggetti i quali riuscivano a percepire sensazioni dolci a seguito dell'applicazione del dispositivo termico; durante la seconda parte invece, veniva chiesto a tali soggetti di provare tre differenti variazioni di temperatura. La prima portava la temperatura a 20°C, stabilita come temperatura di controllo, la seconda variazione portava dai 20°C ai 40°C in 20s ed infine la terza variazione portava dai 20°C ai 40°C in 30s. Durante queste variazioni si è chiesto ai partecipanti di definire quanto forte fosse la percezione dei cinque sapori fondamentali. Le variazioni erano a diverse velocità (come si nota in Fig. 3.14); la temperatura poteva variare di 0.66°C/s (lenta variazione), di 1°C/s (variazione media) e di 1.5°C/s (rapida variazione). Ad ogni stimolazione veniva chiesto ai soggetti di rimuovere l'interfaccia e valutare le sensazioni di intensità, dolcezza e piacere. Si è riscontrato che una più veloce stimolazione termica influenza maggiormente le sensazioni gustative. Sono stati condotti diversi esperimenti negli ultimi anni relativi la stimolazione termica del gusto (Fig. 3.15).

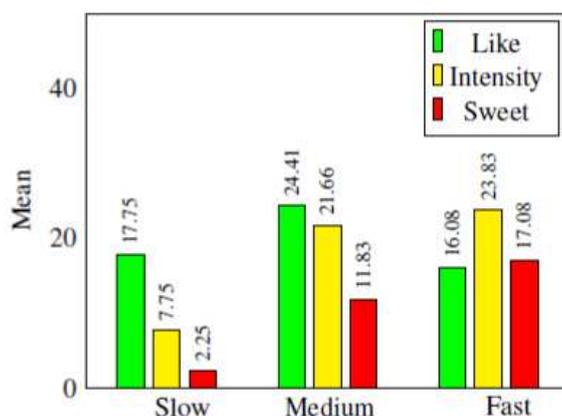


Figura 3.14: Rappresentazione delle medie di sapore dolce, di piacere e di intensità relativo alla velocità di variazione di temperatura [19].

Title	Sensations Produced	Modified Sensations	Stimulation Parameters
Thermal stimulation of taste [5]	<ul style="list-style-type: none"> Warming the anterior edge of tongue produced sweetness Cooling produced sourness and/or saltiness 	nil	<ul style="list-style-type: none"> Heating (20°C to 35°C) Cooling ($\leq 20^\circ$) Rate $\pm 1.5^\circ\text{Cs}^{-1}$
Heat activation of TRPM5 underlies thermal sensitivity of sweet taste [27]	nil	<ul style="list-style-type: none"> Enhanced the gustatory nerve response to sweet compounds 	<ul style="list-style-type: none"> 15°C to 35°C
Influence of temperature on taste perception (A review paper) [26]	<ul style="list-style-type: none"> Warming produced sweetness Cooling produced sourness and/or saltiness 	<ul style="list-style-type: none"> Bitterness decreased by cooling 	nil
Digital Taste and Smell Communication [22]	<ul style="list-style-type: none"> Cooling produced sourness 	nil	<ul style="list-style-type: none"> Cooling (35°C to 20°C)
Digitally stimulating the sensation of taste through electrical and thermal stimulation [23]	<ul style="list-style-type: none"> Produced sweetness and sourness while increasing the temperature 	nil	<ul style="list-style-type: none"> 25°C to 40°C in 80s
Virtual Sweet: Simulating Sweet Sensation Using Thermal Stimulation on the Tip of the Tongue [21]	<ul style="list-style-type: none"> Produced sweetness for heating first and cooling as well as cooling first and then cooling 	nil	<ul style="list-style-type: none"> Heating to Cooling (20°C - 35°C - 20°C) Cooling to Heating (35°C - 20°C - 35°C)
Affecting Tumbler: Affecting our flavor perception with thermal feedback [25]	nil	<ul style="list-style-type: none"> Enhanced the sweetness, saltiness and sourness for apple juice and orange juice 	Applied heating and cooling the skin around nose
Thermal Taste Machine (this paper)	<ul style="list-style-type: none"> Produced significant effects for sweetness, fatty-oiliness, electric, and warmth while heating Produced significant effects for minty, pleasantness, coldness while cooling Showed positive effects towards umami, chemical, spicy and reduction of metallic taste while heating Produced sweet sensations of different intensities using different rates of temperature rise 	<ul style="list-style-type: none"> Produced significant effects on enhancing sweetness of sweet solutions 	<ul style="list-style-type: none"> Heating (25°C - 40°C) Cooling (25°C - 10°C) Different rates of temperature rise for heating (1.5°Cs^{-1}, 1°Cs^{-1}, 0.66°Cs^{-1}) and cooling (0.5°Cs^{-1})

Figura 3.15: Tabella comparativa di diversi lavori relativi il dispositivo per la stimolazione termica [19].

Capitolo 4

Risposta cerebrale alle stimolazioni

Tra i diversi esperimenti che sono stati condotti negli anni, alcuni ricercatori hanno cercato di studiare quale potesse essere la risposta da parte del cervello a seguito delle stimolazioni termiche altri invece hanno studiato l'effetto di stimolazioni magnetiche dei neuroni [22]. Nel primo caso si è fatto uso della risonanza magnetica per immagini funzionale (fMRI) e di un'analisi elettromiografica (EMG), nel secondo invece si è sfruttato l'elettroencefalografia ad altissima densità (*Super high density EEG*).

4.1 L'EEG e la stimolazione magnetica evidenziano

È stato provato che il cervello umano funziona mediante la produzione di impulsi elettrici che partono da specifici cluster di neuroni. Inoltre, il cervello registra specifiche funzioni o percezioni come forme di impulsi in specifiche aree del cervello. Quando i neuroni ricevono stimolazioni con una frequenza elevata, si eccitano e producono segnali elettrici che si propagano alle cellule interconnesse. Ciò avviene anche durante la percezione dei sapori. Comprendendo questo meccanismo di propagazione nel cervello ipoteticamente potrebbe essere possibile modificare, riprodurre o creare la percezione modificando la produzione di segnali attraverso meccanismi fisici non invasivi (**Fig.4.1**).

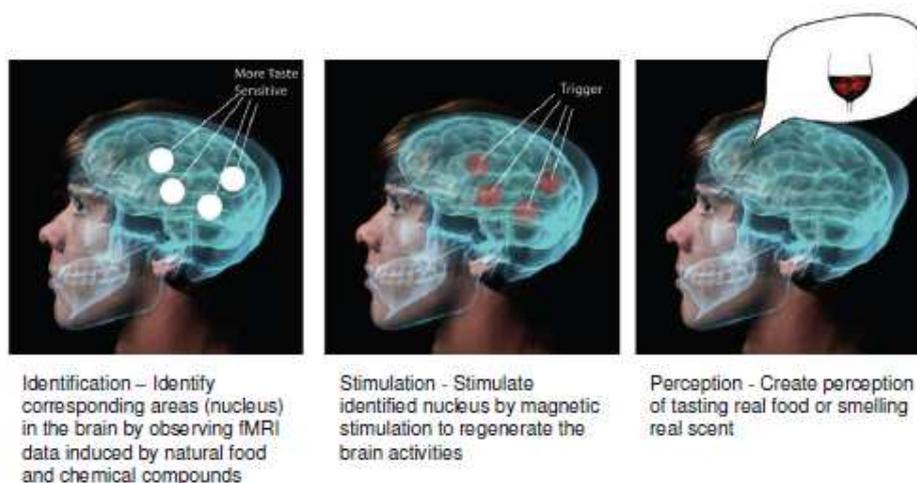


Figura 4.1: Diagramma del sistema di alto livello per la stimolazione di gusto e olfatto [19].

Il processo richiederebbe tre passaggi.

1. Localizzare le aree del cervello in cui avviene la produzione dei segnali corrispondenti alla percezione.

2. Investigare e definire un modello dei comportamenti dinamici della produzione di segnali neurali per ognuna delle percezioni di interesse.
3. Identificare e validare le condizioni critiche della produzione di segnali neurali e dell'accompagnamento del potenziale del campo locale.

In particolare, l'approccio proposto da Ranasinghe per la stimolazione (non invasiva) dei sapori è quello di stimolazione magnetica diviso in tre fasi (**Fig. 4.2**).

Per la prima fase è stato necessario sviluppare un dispositivo per ottenere facilmente le immagini intracraniche. Si è quindi prodotto un sistema a 1024 canali per ottenere una *super high density EEG* [19], inoltre è servito un sistema per la localizzazione spaziale 3D.

La seconda fase, si è concentrata sulla misurazione e sul monitoraggio del corrispondente campo dei potenziali locali sfruttando un *array of single shank multichannel 3D* di elettrodi intracranici microscopici. In aggiunta un modello fisico completo sulla produzione di segnali neurali.

Infine, la terza fase si basa sull'identificazione e validazione delle condizioni critiche della produzione di segnali neurali della percezione. In questo modo è stato possibile capire come modificare e riprodurre le percezioni modificando la produzione di segnali mediante stimoli elettrici.

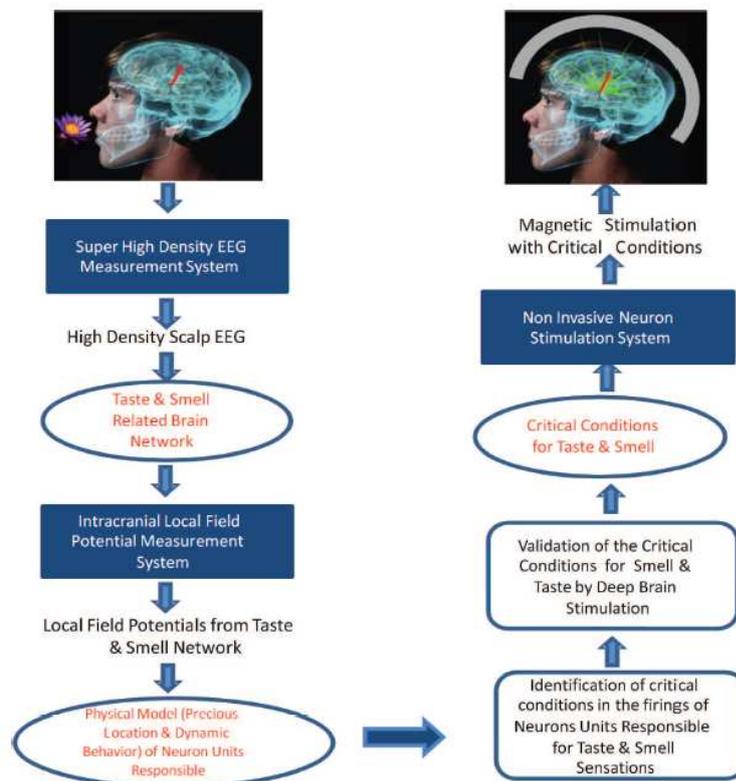


Figura 4.2: Flusso di rigenerazione della percezione del gusto e dell'olfatto attraverso la stimolazione magnetica [19].

4.2 La fMRI in combinazione con l'EMG e la stimolazione termica

La fMRI si è utilizzata durante la somministrazione di alcuni campioni di soluzioni (con una concentrazione di 87mM di zucchero) poste a due temperature differenti ('fredda' (5 ± 2 °C) e 'ambientale' (20 ± 2 °C)). I soggetti vengono divisi in due gruppi: soggetti sottoposti a stimolazione termica e soggetti non sottoposti alla stimolazione termica. Gli appartenenti al gruppo di soggetti sottoposti alla stimolazione hanno manifestato un incremento significativo dell'attivazione delle regioni somatosensoriali, rispetto ai soggetti non sottoposti alla stimolazione termica. In particolare lo studio ha rivelato che il gruppo di soggetti sottoposti alla stimolazione termica mostrava un'elevata attivazione corticale e una risposta di analisi da parte di alcune aree del cervello, ai campioni dolci non grassi rispetto ai soggetti non sottoposti alla stimolazione. Ai partecipanti fu richiesto di fare una colazione leggera per il giorno della sessione di scansioni, oltre a una limitazione nell'apporto di cibi e bevande per le 2h precedenti alla scansione. Uno schema con le istruzioni per un ciclo di fMRI è mostrato in **Figura 4.3**. Durante ogni ciclo, 3mL di un campione, scelto casualmente, veniva assaggiato per 3s e in seguito ingerito. Successivamente venivano acquisite contemporaneamente i dati relativi ad un'EMG e di una fMRI, per determinare l'esatto istante di deglutizione del campione, consentendo in questo modo di conoscere esattamente per quanto tempo il campione rimaneva in bocca ed ottenere un'esatta analisi dei dati della fMRI. In seguito, passati altri 10s veniva risciacquato con 3mL di acqua minerale per almeno altri 3s. Finito il risciacquo ai partecipanti veniva chiesto di valutare la percezione d'intensità di dolcezza, misurata attraverso la 'general Labelled Magnitude Scale' (gLMS), una scala da 1 a 4 premendo un pulsante, dove 1 corrispondeva a debole, 2 a moderato, 3 a forte e 4 a molto forte. Ai soggetti fu espressamente chiarito di considerare il livello di percezione del gusto dopo la somministrazione del saccarosio, attendendo 17 s prima di premere il pulsante. Successivamente, veniva effettuata una seconda somministrazione, dopo ulteriori 8.8s per effettuare un secondo ciclo, avendo così cicli completi in 28.8s ripetuti per 18 volte per ogni singolo partecipante.

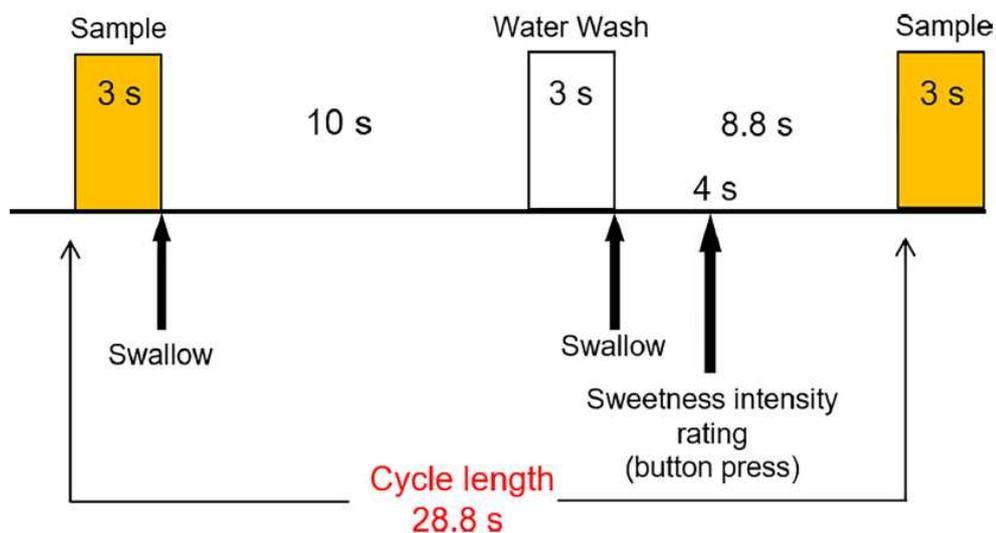


Figura 4.3: Un modello di ciclo di fMRI [22].

Risposte percettive

I soggetti sottoposti a stimolazione termica hanno riportato che l'intensità era compresa tra valori deboli e valori forti della gLMS, con un'intensità media paragonabile a valori moderati (**Fig. 4.4**

Ai). I sapori dolci sono quelli che hanno avuto un maggior percezione (29%) durante la fase di riscaldamento, mentre quelli acidi durante la fase di raffreddamento (39%) (**Fig. 4.4 Aii**). Durante la stimolazione termica della lingua i soggetti percepivano i sapori con una maggiore intensità rispetto ai soggetti non termicamente stimolati, inoltre durante la fase di raffreddamento l'intensità era ancora maggiore rispetto alla fase di riscaldamento (**Fig. 4.4 B**).

In **Figura 4.5** sono mostrati i grafici relativi le intensità di dolcezza per dolce freddo a confronto con dolce a temperatura ambientale. La **Figura 4.5 A** è relativa al primo campione, mentre in **Figura 4.5 B** sono rappresentati i dati relativi le medie di tutti e 18 i campioni, per ciascuno dei gruppi di soggetti testati.

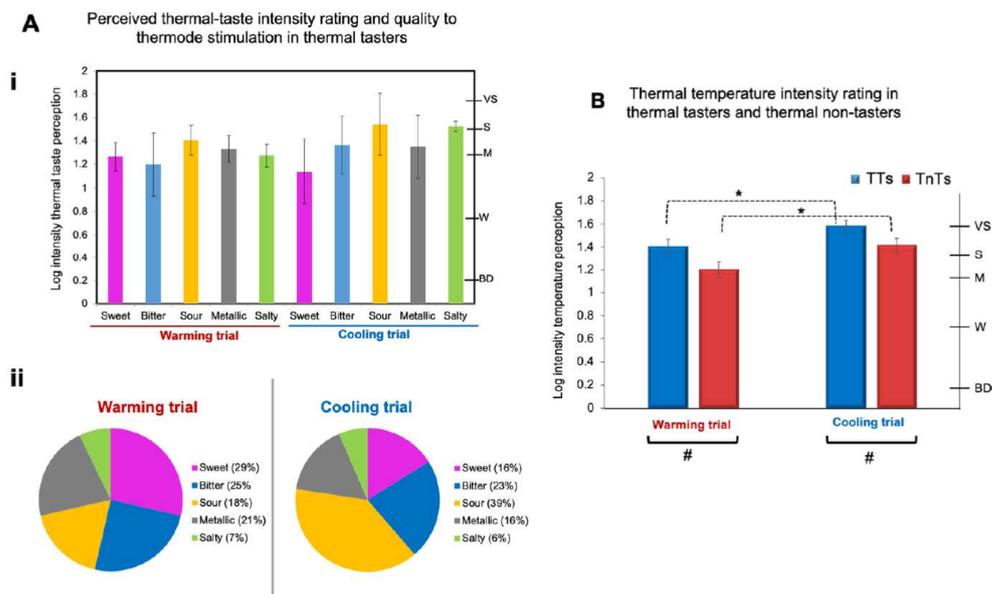


Figura 4.4: Comparazione tra percezioni gustative durante riscaldamento e raffreddamento della lingua e tra soggetti termostimolati a confronto con soggetti non termostimolati [22].

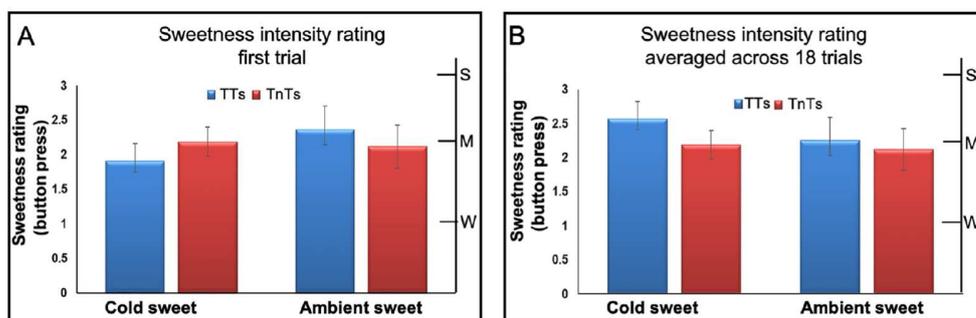


Figura 4.5: Risposte percettive all'intensità di dolcezza durante una fMRI [22].

È interessante notare come la percezione di intensità di dolcezza varia nel tempo; in particolare si nota come durante i periodi in cui si effettua il raffreddamento l'intensità rimanga più o meno costante con una piccola crescita, mentre nei periodi in cui si effettua la misurazione a temperatura ambientale si ha una perdita di intensità all'aumentare dei campioni posti ad assaggio (**Fig. 4.6 A**). Invece non si è riscontrata alcuna differenza dei coefficienti di regressione di adattamento per

i soggetti stimolati termicamente tra la fase a bassa temperatura e quella a temperatura ambientale (**Fig. 4.6 B**).

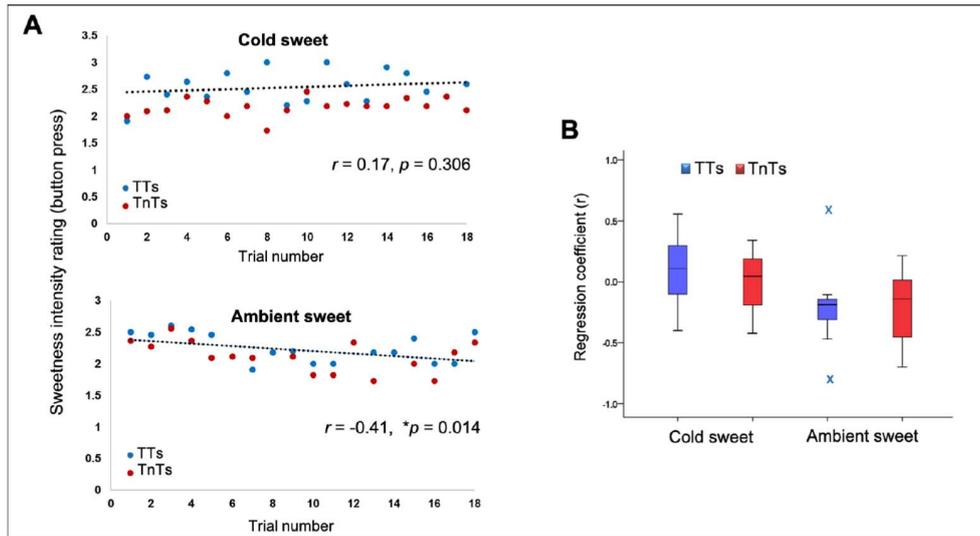


Figura 4.6: Valutazione di adattamento della percezione di intensità di dolcezza dei campioni fMRI [22].

Risposte fMRI

Per entrambi i gruppi di partecipanti sono state raccolte delle scansioni durante la stimolazione per sapori dolci a temperature basse (**Fig. 4.7 A**). Si può notare come le zone che presentano una maggiore risposta sono proprio quelle della corteccia somatosensoriale, aree anteriore e dell'insula media, giro cingolato anteriore, amigdala e talamo. Dalla **Figura 4.7 B** possiamo invece notare come la temperatura moduli la risposta per sapori dolci in tutti i partecipanti, con un aumento di attività bilaterale dell'insula anteriore e dell'insula media sinistra per il sapore 'dolce freddo' a confronto con i campioni di sapore 'dolce temperatura ambientale' ('*cold sweet*' > '*ambient sweet*').

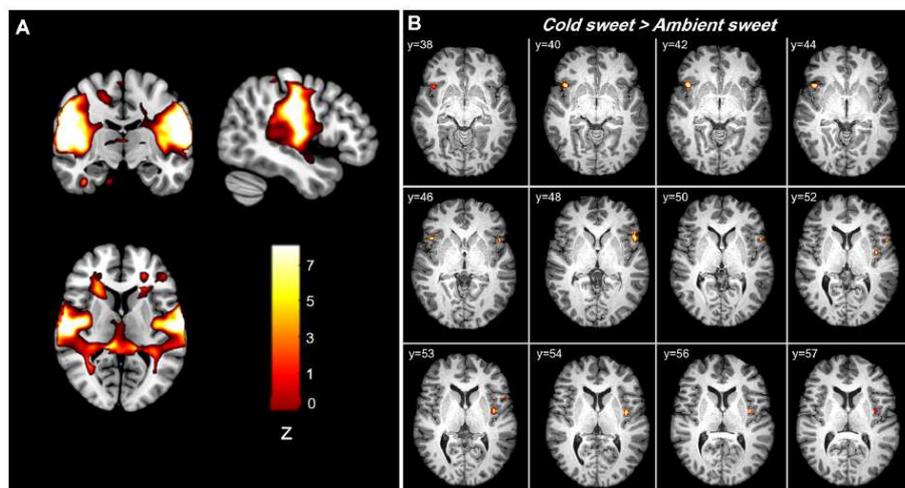


Figura 4.7: A) mappa che mostra la risposta corticale al 'dolce freddo'. B) Mappa differenziale di temperatura per campioni dolci (freddo > ambientale) [22].

I soggetti sottoposti a stimolazione termica (in **Figura 4.8 A** TTs) hanno avuto risposte cerebrali aumentate nella percezione dei sapori dolci rispetto ai soggetti non sottoposti a stimolazione

termica (in **Figura 4.8 B** TnTs). In **Figura 4.8** sono mostrate le scansioni dei cervelli ed è possibile notare come il cervello risponde alla stimolazione con sapore 'dolce freddo' rispetto alla stimolazione con sapore 'dolce ambientale'. In **Figura 4.8 A** i campioni di sapori 'dolci freddi' risultano avere un incremento significativo nell'attivazione dell'insula anteriore bilaterale, dell'opercolo frontale sinistro e del *precentral gyrus* rispetto ai campioni di sapori 'dolci ambientali'. Le risposte del cervello ad entrambi i sapori ('dolce freddo' e 'dolce ambientale') sono rappresentate in **Figura 4.9**, esse rappresentano anche il confronto di stimolazioni tra soggetti stimolati e soggetti non stimolati termicamente. I soggetti stimolati presentano un aumento delle risposte corticali ai campioni dolci indipendentemente dalla temperatura del campione.

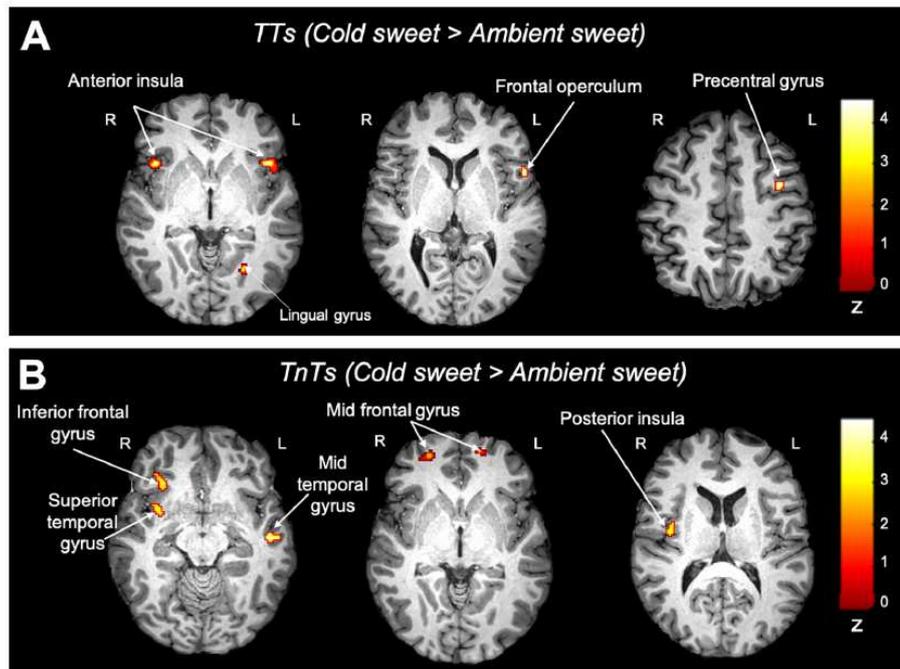


Figura 4.8: Mappe differenziali (RFX) per dolci freddi > dolci ambientali [22].

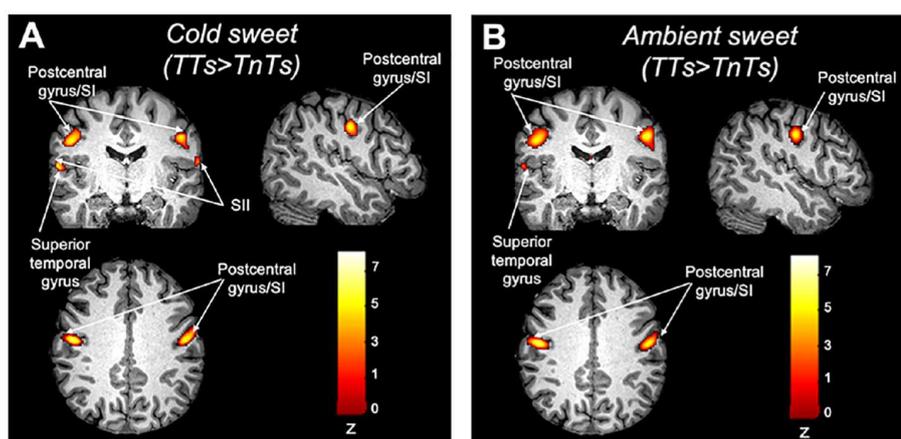


Figura 4.9: Mappe differenziali (RFX) per TTs>TnTs, A) dolci freddi, B) dolci ambientali [22].

I dati raccolti durante le sessioni di fMRI mostrano una forte risposta cerebrale per i campioni 'dolci freddi' e i campioni 'dolci ambientali', da parte di tutti i soggetti sia nel gusto e pure nelle aree orale e somatosensoriali come mostra **Figura 4.7**. Questo studio ha sfruttato le immagini del cervello raccolte con la fMRI per dimostrare per la prima volta l'effetto che la temperatura gioca sulla percezione e sulla risposta corticale del sapore dolce nell'essere umano. La temperatura

dei campioni dolci modulava la risposta cerebrale, riscontrando così una maggiore risposta per i campioni freddi. Questi risultati contribuiscono nella comprensione della percezione dei sapori e dell'impatto dello stato di degustazione termica sulla percezione di quei prodotti alimentari e bevande che necessitano di essere servite fredde, come birra e bevande analcoliche.

Capitolo 5

Applicazioni e prospettive future

La sensazione del gusto è solo una piccola parte degli input sensoriali che il cervello combina per produrre una vera esperienza gustativa, la stimolazione elettrica e termica diretta della lingua, come interfaccia di gusto digitale porterà a molte applicazioni. Riuscire a consentire a due (o due miliardi) di persone di condividere l'esperienza di un pasto meraviglioso come in **Figura 5.1** è uno dei possibili scenari di applicazione del dispositivo di stimolazione della lingua.

Ma, lo sviluppo di dispositivi per la stimolazione della lingua per la percezione gustativa ha come obiettivo a lungo termine quello di permettere la risposta cerebrale per scopi terapeutici ad ampio spettro.



Figura 5.1: Rappresentazione della possibile condivisione di pasti in sede virtuale [19].

5.1 Medico-Patologiche

I diversi studi condotti hanno permesso di rilevare l'importante compito che svolge la lingua. Essa, come abbiamo visto, grazie a stimolazioni termiche ed elettriche permette di stimolare aree del cervello in maniera non invasiva. In base ai dati presentati, è dimostrato che la stimolazione termica è utile per incrementare la percezione dei sapori; quindi, apparecchi in grado di inviare stimoli termici potrebbero in futuro essere di aiuto per patologie come l'ageusia, la disgeusia, oltre che per soggetti che, a seguito di alterato metabolismo, sono costretti a limitare l'assunzione di certi cibi, come i pazienti diabetici o chi soffre di allergie alimentari. Lo scopo rimane quello

di poter garantire una buona qualità di vita, sana, senza rinunciare ai sapori che piacciono di più per questioni di dieta o di salute. Considerando anche gli effetti che si sono riscontrati in alcuni pazienti Sars-CoV2, ovvero la perdita del gusto, sarebbe possibile fare studi a seguito di una stimolazione per verificare se è possibile controllare la percezione. Inoltre, dispositivi in grado di stimolare elettricamente la lingua sono già in fase di studio per applicazioni collaterali, quali ad esempio, quella relativa alla riduzione di disturbi uditivi come l'acufene [23]. Un altro possibile futuro utilizzo è quello per pazienti che soffrono di disfagia, il conforto psicologico di provare sapori piacevoli, senza che questi comportino un rischio, aiuta il paziente a mantenere un livello di vita più confortevole. Infine, la stimolazione elettrica potrebbe permettere inoltre di rilevare anomalie nella trasmissione di segnali nervosi a livello del nervo glossofaringeo e della corda timpanica.

I possibili impieghi medicali sono davvero molteplici e al momento molti di essi sono ancora da svelare.

5.2 Ricreative

Ci sono diversi altri aspetti per i quali potrebbe essere utile l'utilizzo di dispositivo per la stimolazione della lingua, primo tra questi il *gaming*. Infatti, l'utilizzo di dispositivi che stimolano la percezione dei sapori, potrebbe consentire di partecipare ad un banchetto di gruppo durante il videogioco, oppure, consentire esperienze virtuali di cultura culinaria a distanza, permettendo di sperimentare la cucina di grandi *chef* da tutto il mondo.

Capitolo 6

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

- [1] *The sense of taste in virtual reality*, 2017. indirizzo: <https://skarredghost.com/2017/07/07/sense-taste-virtual-reality/> (cit. alle pp. 1, 12, 13).
- [2] T. J. E.R. Kandel J.H. Schwartz, *Principi di Neuroscienze*, 2007 (cit. a p. 2).
- [3] D.U.Silverthorn, *Fisiologia umana, Un approccio integrato*, 2017 (cit. alle pp. 2, 5, 6).
- [4] *Scienze evviva! volume C*. indirizzo: https://mydriferimenti.giuntitvp.it/app/riferimentis/GIAC45_61379C/html/163 (cit. a p. 4).
- [5] B. et al., *Fisiologia medica*, 2011 (cit. alle pp. 4–6).
- [6] B. et al., *Fisiologia e biofisica medica*, 2005 (cit. alle pp. 5, 12).
- [7] *La Bocca, l'inizio del processo digestivo*, 2015. indirizzo: <https://www.armonianaturale.com/la-bocca-inizio-del-processo-digestivo/> (cit. a p. 6).
- [8] *The Neural Bases of Multisensory Processes*. indirizzo: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/riferimenti/NBK92876/> (cit. a p. 7).
- [9] S. Gallarini, *Realtà virtuale, vita no limits*, 2021 (cit. a p. 8).
- [10] A. Basso, *Advantages, Critics and Paradoxes of Virtual Reality Applied to Digital Systems of Architectural Prefiguration, the Phenomenon of Virtual Migration*, 2017. indirizzo: https://www.researchgate.net/publication/321142137_Advantages_Critics_and_Paradoxes_of_Virtual_Reality_Applied_to_Digital_Systems_of_Architectural_Prefiguration_the_Phenomenon_of_Virtual_Migration (cit. a p. 8).
- [11] *La storia della realtà virtuale*. indirizzo: <https://systemscue.it/realta-virtuale-storia/14375/> (cit. a p. 9).
- [12] J. Jerald, *The VR riferimenti: Human-Centered Design for Virtual Reality*, 2016 (cit. a p. 9).
- [13] C. P. Gessica Palhares Rodrigues, *Realidade Virtual: conceitos, evolução, dispositivos e aplicações*, 2013. indirizzo: https://www.researchgate.net/publication/276901072_Realidade_Virtual_conceitos_evolucao_dispositivos_e_aplicacoes/figures?lo=1 (cit. a p. 9).

- [14] L.Montagna, *Realtà virtuale e realtà aumentata*, 2022 (cit. a p. 10).
- [15] *Multi-sense VR helmet in development*, 2009. indirizzo: https://www.theregister.com/2009/03/05/virtual_cocoon/ (cit. a p. 11).
- [16] *GLI AROMI DEL CHIMICO*, 2019. indirizzo: <https://www.cibiexpo.it/gli-aromi-del-chimico/> (cit. a p. 13).
- [17] K. H.Norwich, *The psychophysics of taste from the entropy of the stimulus*, 1984. indirizzo: <http://www.biopsychology.org/norwich/n1984/norwich1984.htm> (cit. a p. 14).
- [18] G. B. Cruz A., *Thermal stimulation of taste*, 2000. indirizzo: <https://doi.org/10.1038/35002581> (cit. alle pp. 14, 15).
- [19] e. a. Ranasinghe N., *Digital taste and smell communication*, 2011 (cit. alle pp. 15–25, 27, 28, 35).
- [20] B. Dodson, *Computer rendering of taste is on the tip of the tongue*, 2013. indirizzo: <https://newatlas.com/computer-rendering-taste-experience-mixed-reality-lab/29948/> (cit. alle pp. 18, 19).
- [21] (Cit. a p. 20).
- [22] e. a. Francis S.T., *Thermal taster status: Temperature modulation of cortical response to sweetness perception*, 2021 (cit. alle pp. 27, 29–32).
- [23] *Electrical stimulation of the tongue relieves tinnitus*, 2020. indirizzo: <https://warpinstitute.org/%5C%E2%5C%9A%5C%A1-electrical-stimulation-of-the-tongue-relieves-tinnitus/> (cit. a p. 36).

Ringraziamenti

Innanzitutto, vorrei esprimere la mia gratitudine al Prof. Gianfranco Santovito, relatore di questo documento, per l'aiuto e il sostegno fornitomi durante la stesura del lavoro.

Desidero ringraziare con affetto i miei genitori e tutta la famiglia per il sostegno, il grande aiuto e per essermi stati vicini in ogni momento durante gli anni di studio, in particolare a mia madre che mi ha incoraggiato a continuare il percorso nonostante il primo anno difficile

Inoltre ho piacere a ringraziare i miei amici per tutti i momenti belli e meno belli passati insieme e le mille avventure vissute. Ognuno di loro mi ha insegnato sempre qualcosa.

Padova, 20 Luglio 2022

Marco Filippino