

Audible Contrast Threshold (ACT™)

Un test diagnostico indipendente dalla lingua per quantificare la capacità di parlare nel rumore come nella vita reale e personalizzare l'entità di aiuto nel rumore nelle impostazioni negli apparecchi acustici

SOMMARIO

La difficoltà di sentire nel rumore è una manifestazione chiave della perdita dell'udito. Per molti, udire nel rumore e soprattutto comprendere il parlato nel rumore rimane un problema anche quando viene fornita la corretta amplificazione tramite l'apparecchio acustico. Sebbene questo fatto sia noto da più di mezzo secolo di ricerca scientifica, non esiste, ad oggi, nessun metodo basato sull'evidenza per adattare gli apparecchi acustici avanzati attraverso impostazioni fondate su una valutazione clinica standard della capacità di udire nel rumore di una persona. Quando si tratta di funzionalità di aiuto nel rumore, alla maggior parte degli utenti di apparecchi acustici vengono offerte le impostazioni predefinite al primo adattamento, e se regolate, le impostazioni sono determinate soggettivamente e spesso rivalutate in un processo di tentativi ed errori. Questo whitepaper introduce il test diagnostico Audible Contrast Threshold (ACT), un metodo indipendente dalla lingua, veloce e affidabile, per valutare la capacità di parlare nel rumore nella vita reale di una persona. Il contesto della ricerca e degli studi che hanno portato allo sviluppo e all'ottimizzazione del test vengono descritti insieme ad una sintesi dei principali principi alla base della procedura di test ACT. Viene quindi presentato il primo studio clinico su larga scala con ACT e utilizzatori di apparecchi acustici. I risultati confermano una forte relazione tra ACT e capacità di parlare nel rumore indipendentemente dalla lingua. Viene quindi dimostrata l'utilità dell'ACT nel facilitare la prescrizione delle giuste quantità di aiuto nel rumore insieme alla elevata affidabilità del test. Con ACT è ora possibile personalizzare l'aiuto nel rumore delle impostazioni più oggettive negli apparecchi acustici in base ai bisogni individuali di aiuto nel rumore di ogni singolo individuo. In uno sforzo congiunto, Interacoustics e Oticon hanno ora definito la prima regola di prescrizione basata sulle evidenze scientifiche per le impostazioni di aiuto nel rumore per gli apparecchi acustici Oticon. Questa regola di prescrizione consente una perfetta integrazione della personalizzazione basata su ACT e il software di adattamento Oticon.

- 02 Sentire nel rumore: l'importanza di guardare oltre l'audiogramma
- 03 Sviluppo del test ACT: Un viaggio scientifico
- 05 Implementazione clinica finale dell'ACT
- 07 Mettere alla prova ACT: Uno studio clinico a doppio sito
- 07 Partecipanti allo studio
- 07 Procedure di test
- 09 Risultati: Relazione tra ACT e comprensione del parlato nel rumore
- 10 Risultati: Affidabilità Test-ritest di ACT
- 10 La prima prescrizione di aiuto nel rumore basata su ACT per gli apparecchi acustici
- 11 Risultati: vantaggi derivanti dall'utilizzo di una prescrizione di aiuto nel rumore basata su ACT
- 12 Utilizzo di ACT per l'adattamento degli apparecchi acustici nella pratica
- 12 Conclusioni
- 13 Ringraziamenti
- 14 Riferimenti

AUTORI

Sébastien Santurette, PhD
Centre for Applied Audiology Research, Oticon A/S

Søren Laugesen, PhD
Interacoustics Research Unit, Interacoustics A/S

Udire nel rumore: l'importanza di guardare oltre l'audiogramma

Da più di 100 anni l'unica misura diagnostica utilizzata per adattare gli apparecchi acustici era l'audiogramma a toni puri. In generale l'audiogramma è servito e continua a servire come misura della capacità di un portatore di apparecchi acustici di sentire i suoni deboli - o la mancanza di questa capacità. Dall'audiogramma, l'audioprotesista (HCP) può affrontare adeguatamente le questioni relative all'udibilità nell'adattamento dell'apparecchio acustico. Tuttavia, ogni operatore sanitario è consapevole del fatto che una perdita dell'udito è molto più che una mancanza di udibilità. In particolare, la perdita dell'udito influisce sulla capacità di comprendere la voce in presenza di rumore di fondo - anche quando l'udibilità è stata adeguatamente compensata (Lopez-Poveda, 2014). Questa non è una realizzazione nuova. Quasi mezzo secolo fa suggeriva Plomp (1978; 1986) un modello per la comprensione del parlato nel rumore a due fattori dannosi indipendenti per l'intelligibilità del parlato: udibilità e distorsione. Entrambi questi fattori contribuiscono alla necessità di un rapporto segnale-rumore (SNR) più elevato per comprendere la voce nel rumore. Altri ricercatori hanno trovato supporto per il modello a due fattori di Plomp, ad esempio, nel senso che l'udibilità da sola (soglie dei toni puri) è in grado di spiegare solo il 50% della variabilità delle performance di parlato nel rumore (Smoorenburg, 1992). Qui, nel contesto del test della soglia di contrasto uditivo (ACT), useremo i termini "perdita di udibilità" e "perdita di contrasto" per riferirci ai concetti di Plomp di udibilità e distorsione, rispettivamente. La perdita di udibilità è ben consolidata e la si misura con l'audiogramma. La perdita di contrasto è un termine nuovo, che si riferisce alla quantità di differenza tra intensità della voce e i suoni indesiderati di sottofondo che desidera sentire. Quindi, se una persona ha una perdita di contrasto grave, necessiterà di un SNR migliore rispetto ad una persona con una lieve perdita di contrasto. Finora non esisteva una misura clinica standard per la perdita di contrasto.

Per compensare problemi di udito nel rumore o di contrasto perdita, i moderni apparecchi acustici utilizzano una

tecnologia molto avanzata per fornire aiuto nel rumore (Jensen & Pedersen, 2015; Andersen et al., 2021). Questa tecnologia è altamente regolabile nel software di adattamento ed è quindi, in linea di principio, in grado di fornire diversi "livelli di aiuto" nel rumore per ciascun utente. Tuttavia, attualmente non esiste un modo oggettivo e basato sull'evidenza per farlo selezionando il livello di aiuto adeguato per l'individuo. Pertanto, le funzionalità di aiuto nel rumore vengono spesso lasciate alle impostazioni predefinite moderate. Questo rappresenta una mancata opportunità, in particolare per quegli utilizzatori di apparecchi acustici che hanno davvero difficoltà a sentire nel rumore e che trarrebbero grandi benefici dalle impostazioni più aggressive di riduzione del rumore. Opportunità simili esistono d'altro canto anche per tutti quei clienti che hanno una capacità di sentire nel rumore quasi normale (una volta che sia stata ristabilita l'udibilità). Tali utenti potrebbero trarre giovamento da un'impostazione più lieve della riduzione del rumore che fornisca una ricostruzione dello scenario sonoro meno elaborata anche in quelle situazioni che la maggior parte degli altri apparecchi acustici gli utenti troverebbero impegnativo. Quindi un test diagnostico oggettivo che possa dare all'audioprotesista delle informazioni riguardo la singola capacità di comprendere la voce nel rumore degli utenti risulterebbe particolarmente utile. Oltre ai potenziali benefici prescrittivi menzionati sopra, una tale previsione della capacità di discriminazione nel rumore risulta importante anche per il counselling per settare le aspettative ed eventualmente anche per fornire ulteriore aiuto nell'assistenza sui dispositivi o sulle tecniche di strategie di comunicazione o training uditivo. Ancora una volta, questa non è un'idea nuova. Per diversi decenni i ricercatori sono alla ricerca di tale tipo di test di diagnostica, ma fino a poco tempo fa con un successo molto limitato (ad esempio, Strelcyk & Dau, 2009; Johannesen et al., 2014; Thorup et al., 2016). La situazione cominciò a cambiare all'inizio del 2010, quando furono pubblicati articoli di ricerca che mostravano correlazioni elevate finora mai viste tra le misure di prestazione del parlato nel rumore e la cosiddetta soglia di rilevamento della modulazione spettro-temporale (STM). (Bernstein et al., 2013; Mehraei et al., 2014) nei partecipanti con perdita dell'udito.

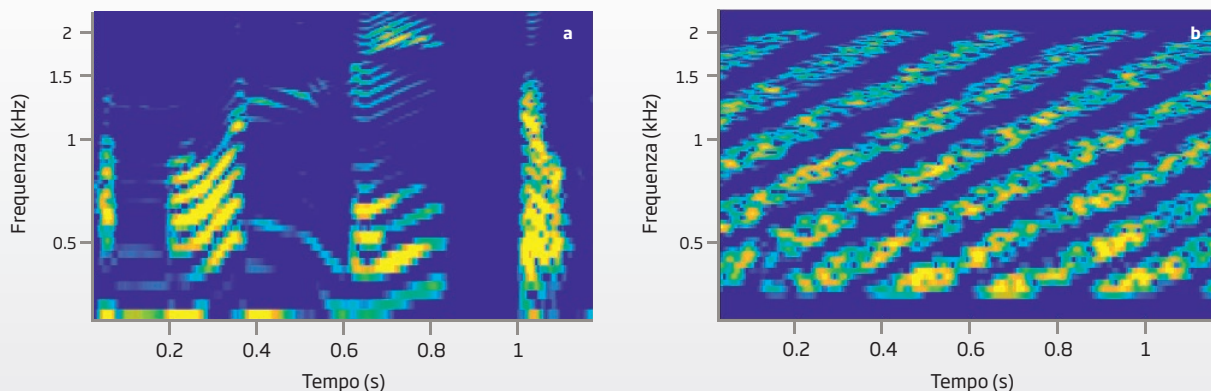


Figura 1: Spettrogrammi di (a) una singola frase danese dal test Hearing In Noise (HINT, Nielsen & Dau, 2011), e (b) uno stimolo STM/ACT con la massima modulazione spettro-temporale imposta.

Le modulazioni spettro-temporali sono intrinseche al segnale vocale e le modulazioni utilizzate per i test STM lo sono come quelle che si trovano nel parlato, anche se in modo stilizzato. Guarda esempi di spettrogrammi di parlato reale e stimoli STM nella Figura 1.

Una soglia di rilevamento STM (ed eventualmente un valore udibile della soglia di contrasto, o ACT) viene trovata sperimentalmente variando in modo adattivo il grado di modulazione dello stimolo, che viene fornito tramite cuffie o con gli auricolari. Viene chiesto alla persona sottoposta al test di rispondere agli stimoli "bersaglio" con modulazioni e confrontarli con stimoli "di riferimento" non modulati. La soglia, quindi, è rappresentata dal più piccolo grado di modulazione che la persona può rilevare.

Il pensiero generale è questo se una persona è brava nel test ACT (o equivalentemente nel rilevamento STM), allora sarà in grado di separare il discorso dal rumore di fondo anche quando il valore di contrasto è basso.

Viceversa, una persona con ACT/STM scarso avrà bisogno di un contrasto maggiore tra parlato e rumore di fondo per comprendere il discorso. Utilizzare ACT/STM per stimare la capacità di parlare nel rumore ha l'ulteriore vantaggio che il test non utilizza materiale vocale dipendente dalla lingua ma si basa su stimoli artificiali. In questo modo, ACT/STM può essere utilizzato con chiunque in qualsiasi paese, indipendentemente da background linguistico.

Nonostante i risultati incoraggianti di Bernstein et al. (2013) e Mehraei et al. (2014), c'erano ancora delle sfide da risolvere. Quando il test STM di Bernstein et al. (2013) è stato utilizzato in un ampio studio clinico in Svezia (Bernstein et al., 2016), circa un terzo dei partecipanti testati non sono stati in grado di ottenere soglie STM adeguate dalla procedura del test adattivo.

Sulla base di questa miscela di risultati molto promettenti e considerando le notevoli barriere all'utilizzo clinico dello studio, Interacoustics e Oticon hanno deciso di intraprendere insieme un viaggio di ricerca. Gli obiettivi erano approfondire il test STM per sfruttarne completamente il potenziale e, infine, trasformarlo in uno strumento clinico utilizzabile: il test della Soglia di Contrasto Acustico (ACT).

Sviluppo del test ACT: Un viaggio scientifico

Questa sezione descrive una successione di studi di ricerca svolto presso l'Unità di Ricerca Interacoustics in collaborazione con l'Università Tecnica della Danimarca

(DTU). Il punto di partenza è stato il test STM proposto da Bernstein et al. (2013; 2016) e il punto finale il test clinico ACT. Il primo studio (Zaar et al., 2023a) aveva l'obiettivo primario di risolvere il "problema del tetto" di Bernstein et al. (2016) per consentire a tutti i partecipanti di ottenere una soglia adeguata dalla prova. Per raggiungere questo obiettivo, sono state introdotte diverse modifiche alle procedure di prova:

- Il paradigma del test è stato modificato da scelta tra 2 alternative a (2-AFC) a un paradigma 3-AFC. Nel 2-AFC, il compito del partecipante è identificare lo stimolo modulato tra una coppia casuale di stimolo di riferimento non modulato e uno stimolo target modulato. In questo modo, il partecipante deve memorizzare come risulta il target modulato. In 3-AFC, il compito è identificare la stranezza in una terna di stimoli due di riferimento e un target posizionato casualmente. In questo modo, non deve essere stabilito nessuna idea specifica del suono target, il che rende più semplice il compito.
- Ciascuna presentazione di stimolo è stata estesa da 0,5 a 1 secondo. Concedere più tempo per rilevare le modulazioni rende il compito più semplice.
- Invece della presentazione dello stimolo mono come in Bernstein et al. (2013; 2016), sono stati presentati gli stimoli bilateralmente. Questa modifica è stata principalmente introdotta per migliorare la corrispondenza con l'ascolto nel mondo reale agli scenari di parlato nel rumore, in cui vengono utilizzate entrambe le orecchie. Anche questa modifica contribuisce a facilitare il compito.
- Infine, è stata introdotta la modellazione specifica della frequenza degli stimoli del test, sulla base della strategia "sufficientemente udibile" strategia proposta da Humes (2007). Questa procedura tiene conto dell'audiogramma individuale e garantisce che ci siano almeno 15 dB di udibilità in tutta la gamma di frequenze della stimolazione, vedere Figura 2. Oltre a garantire piena udibilità, la procedura si avvicina anche all'amplificazione che gli apparecchi acustici fornirebbero nelle situazioni di voce nel rumore. L'approccio sufficientemente udibile contrasta con quello adottato da Bernstein et al. (2013; 2016), dove gli stimoli venivano riprodotti ad un volume fisso senza modellazione della frequenza. L'approccio di Bernstein non garantisce né la piena udibilità né corrisponde al modo in cui gli apparecchi acustici amplificano scenari di parlato nel rumore.

Oltre a valutare le citate modifiche introdotte al paradigma del test, diverse versioni di STM sono state esaminate nello studio. Questi includono varianti basati su un segnale portante complesso di toni come alternativa alla portante stazionaria con rumore rosa a banda limitata utilizzata fino ad allora. Tredici partecipanti ipoacusici al test sono stati reclutati per lo studio e sono stati testati su diverse varianti di STM, nonché due varianti di test del parlato nel rumore regolate in laboratorio. Nello specifico, a cosiddetti "ecologicamente validi" (Keidser et al., 2020) è stata sperimentata la configurazione del parlato nel rumore. Lì, tutti i giorni frasi del test danese Hearing In Noise Test (HINT, Nielsen & Dau, 2011) sono state presentate su uno sfondo di oratori concorrenti presentati da separati altoparlanti insieme ad un basso livello di parlato nel rumore (vedere la Figura 6 di seguito). Inoltre, gli altoparlanti sono stati allestiti in una stanza con moderato riverbero. Collettivamente questo ha creato uno scenario di ascolto più realistico rispetto ad una configurazione più standard dove il discorso target viene presentato rispetto al rumore stazionario, entrambi dallo stesso altoparlante (co-posizionato). Quest'ultima configurazione è stata anche testata per un confronto. In entrambe le condizioni, l'udibilità era assicurata in questo modo come descritto

nella Figura 2, con una amplificazione individualizzata fornita ai segnali degli altoparlanti. Quindi, i partecipanti del test ascoltavano con le orecchie libere nel test di voce nel rumore. I risultati dello studio possono essere riassunti come segue:

- Tutti i partecipanti al test hanno prodotto un rilevamento STM corretto delle soglie in tutte le condizioni testate, indicando che la questione del soffitto di Bernstein et al. (2016) era risolto con successo.
- Correlazioni tra soglie STM e soglie di ricezione del parlato nel rumore (SRTn) dalle due varianti del test del parlato nel rumore erano inevitabilmente maggiori per la condizione ecologicamente valida rispetto alla condizione standard co-localizzata. Pertanto, facendo un grande passo verso test più realistici del parlato nel rumore, la relazione tra STM e la performance del parlato nel rumore assistita è rafforzata. Notare che in questo white paper l'abbreviazione SRTn si riferisce alle soglie di ricezione del parlato nel rumore, questo è l'SNR richiesto per ripetere correttamente il 50% delle frasi presentate.
- La relazione tra STM e la performance assistita del parlato nel rumore era intatta dopo aver introdotto diverse modifiche alla procedura di prova STM.

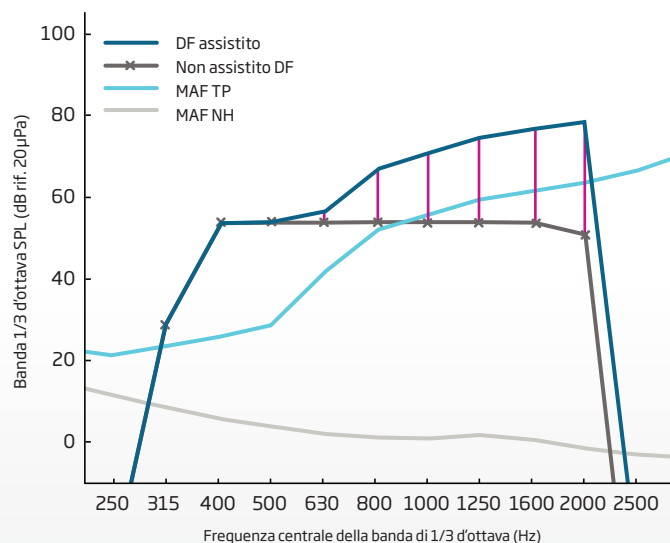


Figura 2: Illustrazione dello schema è utilizzato per garantire la piena udibilità degli stimoli ACT per ciascun individuo. La linea grigio scuro mostra lo spettro degli stimoli ACT in banda di 1/3 d'ottava del livello di pressione sonora (SPL), come verrebbero presentati a un partecipante con udito normale (in campo diffuso (DF), anche se gli stimoli vengono infatti trasmessi tramite cuffie). La linea grigio chiaro mostra la soglia uditiva del campo diffuso (campo udibile minimo, MAF, ISO389-7) per un udito normale, indicando un'eccellente udibilità degli stimoli ACT senza aiuto. La linea azzurra indica la soglia uditiva per un partecipante ipoacusico rappresentativo al test con problemi di udito (TP), lasciando parte degli stimoli ACT senza aiuto al di sotto della soglia per questa persona. Le linee magenta verticali indicano il guadagno aggiunto alle frequenze centrali della banda di 1/3 d'ottava per garantire 15 dB di udibilità in tutta la gamma di frequenze degli stimoli ACT. La linea blu scuro mostra infine lo spettro degli stimoli ACT "sufficientemente udibili" (DF assistito).

I due candidati più promettenti al test STM del primo studio sono stati poi testati in un nuovo gruppo di 30 utilizzatori di apparecchi acustici, che sono stati sottoposti anche al test del parlato nel rumore con l'impostazione ecologicamente valida (Zaar et al., 2023b). Relativamente al primo studio, la compensazione dell'udibilità per il test STM è stata modificata in considerazione di ciascun orecchio individualmente (la compensazione in Zaar et al. (2023a) era basata su un audiogramma medio sinistra-destra). Per i test del parlato nel rumore, la compensazione dell'udibilità è stata gestita dall'apparecchio acustico Oticon Opn applicato bilateralmente con le regolazioni date dal metodo prescrittivo proprietario di Oticon, il VAC+ (Le Goff, 2015). IL test del parlato è stato condotto con 3 impostazioni delle caratteristiche dell'aiuto nel rumore dell'apparecchio acustico, OpenSound Navigator (OSN): Spento (OSN inattivo), Medio (impostazione OSN predefinita) e Forte (impostazione OSN forte personalizzata). I partecipanti a questo studio sono stati reclutati in modo specifico per coprire un'ampia gamma di capacità del parlato nel rumore. L'accento è stato dato al reclutamento di partecipanti con gravi problemi di comprensione del parlato nel rumore, per testare la nostra soluzione dal primo studio. In sintesi, i risultati erano:

- La configurazione preferita dello stimolo STM in termini di migliore affidabilità test-retest era quello basato sulla portante del rumore a 354-2000 Hz e parametri di modulazione di 2 cicli per ottava di ripple spettrale e 4 Hz di modulazione temporale. Questa è la stessa configurazione utilizzata da Bernstein et al. (2016).
- Gli SRTn in condizione Off dal test ecologicamente valido del parlato nel rumore assistito erano ben predetti dalle soglie STM con $R^2 = 0,61$, mentre la Media dei toni puri (PTA) a 4 frequenze per l'orecchio migliore ha prodotto $R^2 = 0,51$. STM e PTA hanno fornito un potere predittivo complementare,

evidenziato da $R^2 = 0,69$ per un modello di regressione a due predittori. Quindi, la relazione tra STM e prestazioni di parlato nel rumore assistito era altrettanto robusta in questo gruppo esteso dei partecipanti al test.

- Il vantaggio in SRTn tra le impostazioni lieve e forte dell'OSN era ben previsto sia da STM ($R^2 = 0,51$) sia da PTA ($R^2 = 0,54$); i due forniscono nuovamente informazioni complementari ($R^2 = 0,64$ in un modello combinato). Questo risultato ha fornito la prima prova per suggerire come potrebbe essere utilizzata la STM (e quindi l'ACT) per prescrivere le impostazioni di aiuto nel rumore. Questo sarà ulteriormente esplorato di seguito.

Implementazione clinica finale dell'ACT

Nell'ultima tappa del percorso di ricerca, il paradigma del test STM sopra descritto è stato tradotto in un valido strumento clinico: il test della soglia di contrasto udibile (ACT) (Zaar/Simonsen et al., 2023c). Il principio guida era quello di creare una procedura per ACT che sarebbe stata il più vicino possibile a quello dell'audiogramma a toni puri, rendere ACT facile da adottare per gli audioprotesisti. Più specificamente, i requisiti erano (i) ridurre la durata del test in qualcosa di clinicamente accettabile, (ii) utilizzabile con solo le apparecchiature già disponibili in una tipica clinica (cuffie/ inserire gli auricolari e il pulsante di risposta), e (iii) mantenere i vantaggi ottenuti dalla versione di ricerca.

Nel paradigma di test preferito, al partecipante del test viene presentata, quando attivata dall'audioprotesista, una serie di stimoli ad "onde" di 1 secondo, con onde target modulate che appaiono tra onde di riferimento non modulate. Vedere Figura 3. Il grado di modulazione varia in modo adattivo in base alla regola Hughson-Westlake 2-down 1-up con 2 dB di dimensione del passo. La misurazione termina quando 3 punti di svolta ascendenti su 5 si ottengono allo stesso livello di modulazione;

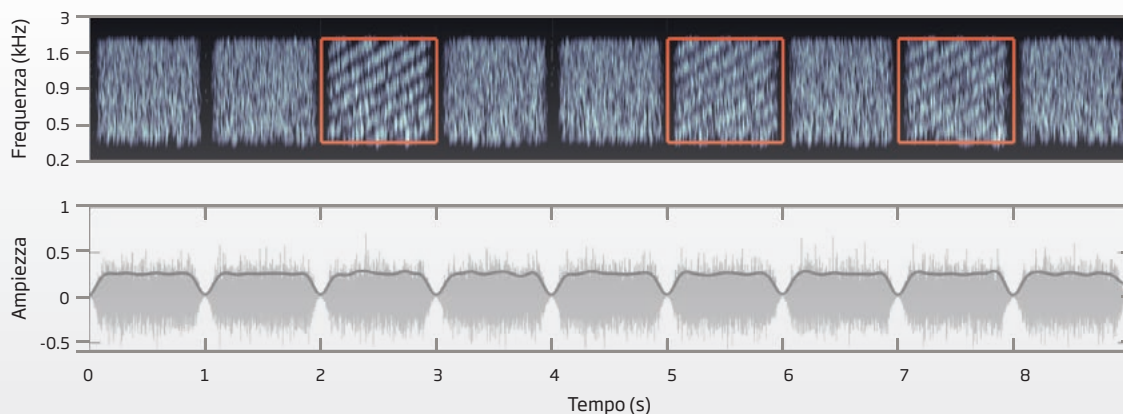


Figura 3: Illustrazione del paradigma del test delle onde utilizzato con ACT, con lo spettrogramma (in alto) e la forma d'onda (in basso). Le onde target modulate sono indicate nello spettrogramma con riquadri rossi.

un esempio di funzionamento del test è mostrato in Figura 4a. In una fase successiva, i punti dati all'interno della finestra della soglia candidata di Hughson-Westlake (TCW, indicati nella Figura 4a) vengono utilizzati per stimare un valore psicometrico da cui viene determinata la soglia finale (Figura 4b); vedere (Zaar/Simonsen et al., 2023c) per dettagli. Questo paradigma di test si è rivelato superiore ai suoi concorrenti esaminati in termini di affidabilità di test-retest. Inoltre, è stato trovato il miglior accordo con i risultati di base ottenuti nello studio precedente con la versione di ricerca del test.

Per allineare ulteriormente l'ACT con l'audiogramma a toni puri, è stata introdotta una nuova scala di valutazione: la scala del livello di contrasto normalizzata (già applicata in Figura 4). A tal fine, 25 giovani normo udenti sono stati reclutati come partecipanti al test e le relative soglie di modulazione sono state determinate con il paradigma delle onde descritto sopra. I risultati sono stati registrati su una scala di livello di modulazione tecnica, dove 0 dB Full Scale (FS) corrisponde alla modulazione massima possibile. Questi risultati sono mostrati nella Figura 5, insieme alla proposta normalizzata della scala del livello di contrasto (nCL). La nuova scala è allineata con i dati in modo tale che la performance

mediana è vicina a 0 dB nCL, mentre si allinea la griglia di test da 2 dB per includere la modulazione massima a 0 dB FS. In questo modo, 0 dB nCL corrisponde a performance normali, mentre valori positivi dB nCL indicano un certo grado di perdita di contrasto e i valori negativi dB nCL indicano valori migliori di una performance normale. Inoltre, in allineamento con la procedura dell'audiogramma, in cui il test è limitato a -10 dB HL, il livello di contrasto normalizzato non viene adattato oltre -4 dB nCL, due gradini sotto 0 dB nCL. In questo modo, la scala del livello di contrasto (dB nCL) utilizzata per l'ACT quantifica la perdita di contrasto allo stesso modo di come la scala del livello uditivo (dB HL) quantifica la perdita di udibilità.

Per riassumere, il test ACT è stato sviluppato come uno strumento clinicamente valido che consente all'operatore sanitario di stimare la performance potenziale dell'individuo in situazioni di parlato nel rumore in modo rapido, conveniente e accurato, in condizioni in cui l'udibilità è stata adeguatamente affrontata con l'amplificazione dell'apparecchio acustico. In particolare, l'ACT può essere convenientemente misurato subito dopo l'audiogramma - quando il partecipante al test sta già indossando le cuffie o inserisce gli auricolari e ha il

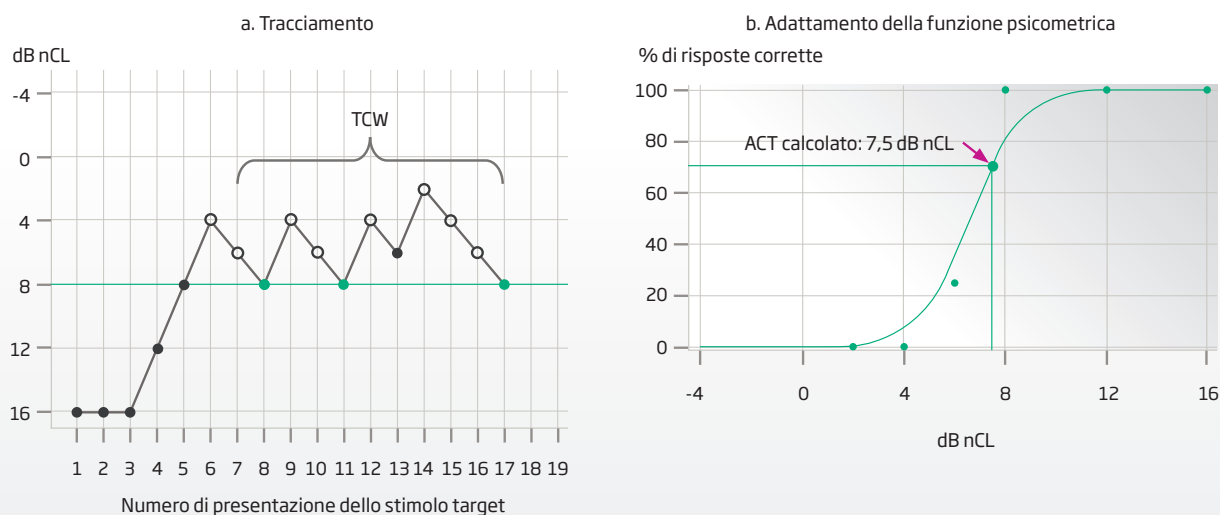


Figura 4: (a) Esempio di "Tracciamento della traccia" di un'esecuzione dell'ACT. Un simbolo pieno indica che la presentazione dello stimolo target è stata rilevata correttamente dal partecipante al test, un simbolo aperto indica un target che non è stato rilevato e i segni con la spunta verde indicano i 3 punti di svolta ascendenti uguali che soddisfano il criterio di Hughson-Westlake. Inoltre, viene indicata la finestra della soglia candidata (TCW). (b) Funzione psicometrica adatta ai dati nel TCW da (a). Il risultato finale dell'ACT è determinato nel punto 72% sulla curva psicometrica, come indicato dalle linee rette.

pulsante di risposta in mano. Quindi, queste informazioni sono rese subito disponibili nel processo di adattamento e per la prima volta in assoluto, l'audioprotesista può affrontare direttamente il problema numero uno dei portatori di apparecchi acustici: quella di riuscire a sentire nel rumore (Jorgensen & Novak, 2020; Manchaiah et al., 2021). Inoltre, ciò può basarsi su una misura diagnostica con una solida base di prove: ACT. Come notato sopra, ACT è utile per il counselling, per la definizione delle aspettative sugli apparecchi acustici e per raccomandare un ulteriore aiuto in termini di dispositivi per l'ascolto assistito, comunicazione di strategie e allenamento uditivo. Tuttavia, potenzialmente l'uso più potente di ACT è quello di prescrivere le regolazioni delle impostazioni di supporto nel rumore dell'apparecchio acustico, come verrà approfondito di seguito. Infine, vale la pena ribadire che ACT è un test che non utilizza una lingua specifica e ciò consente a chiunque di essere testato, indipendentemente dalla propria lingua nativa.

Mettere alla prova ACT: Uno studio clinico a doppio sito

Una volta che lo stimolo e la procedura del test ACT vengono ottimizzati per uso clinico, il passo successivo è stato confermarne l'applicabilità a popolazioni cliniche reali di portatori di apparecchi acustici. In un primo studio clinico internazionale a doppio sito, ricercatori indipendenti provenienti dalla Germania (Università di Scienze applicate, Lubeca) e dal Giappone (General Associazione incorporata Shinden-Ogawa Audiologia e Laboratorio per apparecchi acustici, Clinica OTO Tokyo e Keio Scuola Universitaria di Medicina, Tokyo; Saiseikai Ospedale Utsunomiya, Utsunomiya) hanno misurato i valori ACT e prestazioni del parlato nel rumore in diverse popolazioni degli utilizzatori di apparecchi acustici. Per maggiori dettagli sullo studio, vedere Zaar/Simonsen et al. (2023c). Lo studio ha affrontato le seguenti domande di ricerca:

1. La domanda di ricerca principale era se, in due gruppi di utenti nella vita reale che percorrono diversi flussi clinici, diverse procedure di adattamento e con due lingue native molto diverse, la relazione tra i valori ACT e la comprensione del parlato nel rumore osservato negli studi accademici precedenti sopra descritti sono ancora validi.
2. Inoltre, lo studio ha esaminato se l'ACT potrebbe aumentare la previsione dell'abilità del parlato nel rumore rispetto all'uso del solo audiogramma.

Partecipanti allo studio

Nella prima parte dello studio, 100 utenti esperti di apparecchi acustici con perdita dell'udito da lieve a grave (bilaterale Gamma media tono puro a 4 frequenze: da 29 a 79 dB HL, media: 51 dB HL, media: 52 dB HL) di età compresa tra 32 e 79 anni (mediana: 68 anni, media: 66 anni) sono stati sottoposti a un adattamento standard dell'apparecchio acustico utilizzando gli apparecchi acustici Oticon More 1. Le procedure di adattamento per il guadagno e la scelta dell'accoppiatore hanno seguito la pratica più comune in ciascuno dei due siti clinici. Gli 81 partecipanti tedeschi erano stati regolati con il metodo prescrittivo NAL-NL2 (Keidser et al., 2011) e l'amplificazione è stata verificata utilizzando le misurazioni nell'orecchio reale (REM). Il loro accoppiamento acustico all'orecchio era scelto come prescritto dal software di adattamento Genie 2. I 19 partecipanti giapponesi, per la regolazione del guadagno, sono stati sottoposti al metodo di riabilitazione uditiva Utsunomiya (Yamada et al., 2020) e sono stati adattati seguendo le linee guida definite dalla Japan Audiological Society (Kodera et al., 2016). Seguendo la pratica locale, tutti hanno ricevuto chiocciole personalizzate senza ventilazione e le REM venivano utilizzate per valutare l'amplificazione.

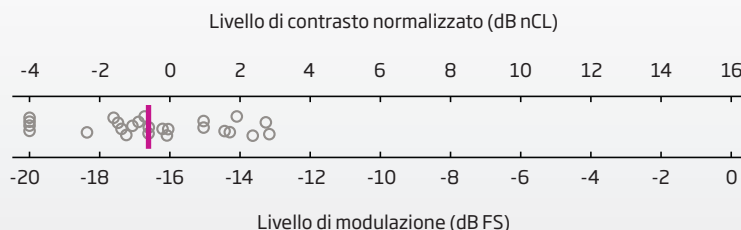


Figura 5: Risultati dello studio normativo con 25 giovani normo udenti partecipanti al test mostrano sulla scheda tecnica l'asse del livello di modulazione (dB FS) (in basso) e l'asse del livello di contrasto normalizzato proposto (dB nCL) (in alto). I cerchi grigi rappresentano i dati individuali, mentre la linea verticale in grassetto indica il livello di modulazione mediano.

Procedure di test

Dopo una valutazione audiometrica standard, tutti i partecipanti hanno eseguito il test ACT due volte per valutarne l'affidabilità test-retest. L'ACT è stato inoltre eseguito due volte circa sei mesi dopo per valutare l'affidabilità test-retest tra diverse visite. Dopo l'adattamento dell'apparecchio acustico, la comprensione del parlato dei partecipanti nel rumore è stata valutata mentre indossavano gli apparecchi acustici, utilizzando una versione ecologicamente valida dell'Hearing in Noise Test (HINT, Nilsson et al., 1994). Qui sono stati utilizzati i corpora tedesco (Joiko et al., 2021) e giapponese (Shiroma et al., 2008) dell'HINT. Per rendere l'impostazione del test più vicina ad una situazione di ascolto nella vita reale rispetto ai tradizionali speech-in-noise test (vedi Figura 6), sono stati posizionati mascheratori spazialmente separati a 100° e 260° attorno al partecipante e ciascun mascheratore era costituito da una voce interferente specifica del paese mescolata con rumore stazionario di tipo parlato (SSN). Le frasi target HINT sono state presentate frontalmente a 0°. Sono state monitorate le soglie di ricezione del parlato nel rumore (SRTns) corrispondenti al 50% dell'intelligibilità della frase per quattro diverse impostazioni della funzione avanzata di aiuto nel rumore

di ultima generazione di Oticon, MoreSound Intelligence™ (MSI). I diversi livelli di aiuto MSI nel rumore sono indicati come Off, Basso, Moderato e Alto.

Per verificare che i livelli di aiuto MSI testati fornissero effettivamente diversi livelli di miglioramento dell'SNR, sono state effettuate misurazioni tecniche nella configurazione HINT ecologicamente valida mostrata nella Figura 6, utilizzando un simulatore di testa e busto che indossava apparecchi acustici Oticon More 1. L'SNR di uscita ponderato con l'indice di intelligibilità vocale a banda larga è stato calcolato utilizzando il metodo di inversione di fase di Hagerman e Olofsson (2004). I risultati, mostrati nella Figura 7, hanno confermato che il miglioramento complessivo del SNR è aumentato con l'aumentare del livello di aiuto. Si noti che, per tutti i livelli di aiuto, il miglioramento SNR fornito da MSI dipende dall'SNR di input. Ciò significa che MSI adatta il grado di elaborazione applicato alla complessità della scena sonora in questione, in modo tale che venga progressivamente applicato un maggiore miglioramento dell'SNR man mano che la scena sonora diventa più complessa (ovvero verso SNR di ingresso più bassi nella Figura 6).

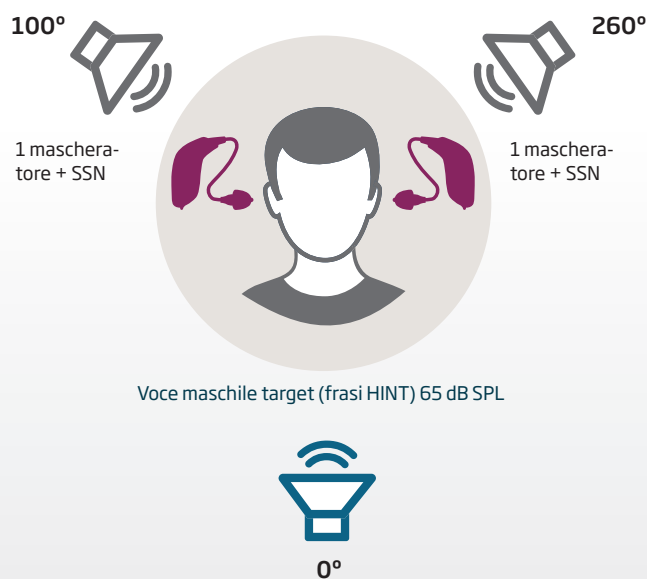


Figura 6: Configurazione HINT ecologicamente valida per misurare la comprensione della voce nel rumore, con una voce bersaglio dalla parte anteriore e voci interferenti mescolate con rumore di tipo parlato (SSN) dai lati.

Risultati: Relazione tra ACT e comprensione del parlato nel rumore

La nostra domanda di ricerca principale era se la relazione significativa tra i valori ACT e la comprensione del parlato nel rumore osservata negli studi precedenti fosse presente anche nelle popolazioni cliniche testate più diversificate. Per rispondere a questa domanda, abbiamo calcolato la correlazione tra i valori ACT dei partecipanti e i loro SRTns con il livello di aiuto Off, ovvero quando negli apparecchi acustici veniva fornita solo l'amplificazione e l'MSI era disattivato. Tra tutti i 100 partecipanti, la correlazione era altamente significativa ($p < 0,001$) e di dimensioni simili alle correlazioni ottenute in studi precedenti con i predecessori dell'ACT, con un coefficiente di correlazione di Pearson $r = 0,70$. È importante sottolineare che la correlazione è rimasta altamente significativa quando calcolata solo per i partecipanti tedeschi ($r = 0,67$, $p < 0,001$) e solo per i partecipanti giapponesi ($r = 0,85$, $p < 0,001$). Questi risultati hanno confermato che l'ACT è un indicatore significativo della capacità di sentire la voce nel rumore in contesti ecologicamente validi quando agli utenti di apparecchi acustici viene fornita solo l'amplificazione nei loro dispositivi. Inoltre, ci si può aspettare che ciò valga in

popolazioni cliniche con lingue native diverse e il cui guadagno venga regolato e l'accoppiamento acustico scelto in base a diverse filosofie di adattamento.

Avendo stabilito che l'ACT era significativamente correlato alla capacità di parlare nel rumore, l'analisi successiva ha quindi indagato se l'utilizzo dell'ACT potesse portare a una migliore previsione della capacità di parlare nel rumore rispetto all'utilizzo del solo audiogramma. I risultati di un'analisi di regressione multivariata, illustrati nella Figura 8, hanno mostrato che l'ACT era il predittore più forte e significativo degli SRTns degli utenti ($R^2 = 0,49$, $p < 0,001$), mentre la media dei toni puri a 4 frequenze attraverso l'orecchio (PTA) era un predittore significativo moderatamente forte ($R^2 = 0,40$, $p < 0,001$) e l'età era un predittore debole ma comunque significativo ($R^2 = 0,04$, $p = 0,043$). Pertanto, l'ACT da solo potrebbe spiegare il 49% della varianza negli SRTns degli utenti. Combinando l'ACT con gli altri due predittori significativi di cui sopra (PTA ed età), è stato possibile spiegare il 59% della varianza negli SRTns degli utenti, che è molto più alto di quanto era ottenibile con il solo audiogramma (40%).

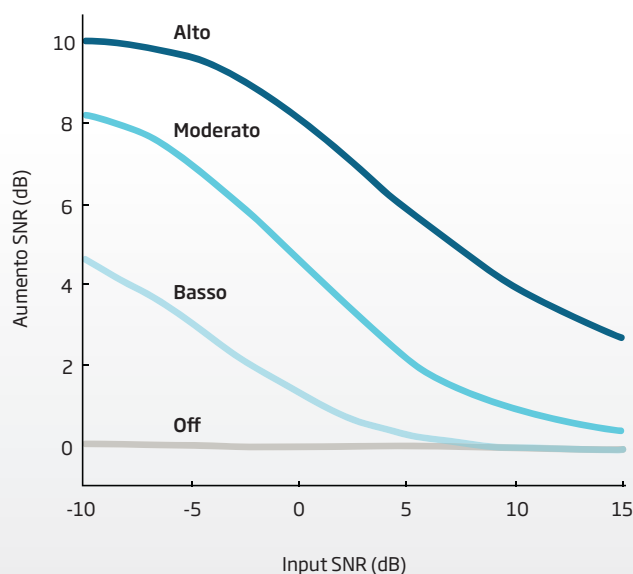


Figura 7: Miglioramento SNR fornito da MoreSound Intelligence per i quattro livelli di aiuto testati nel rumore (Off, Basso, Moderato, Alto), misurati con un simulatore di testa e busto nella configurazione di test della Figura 6.

La combinazione di valori ACT e PTA (e, in misura molto minore, l'età) è quindi clinicamente significativa per prevedere in modo più preciso la capacità di sentire la voce nel rumore di un singolo utente. Per illustrare ulteriormente ciò, la Figura 9 mostra la relazione tra gli SRTns dei 100 partecipanti previsti dal loro audiogramma, dai valori ACT e dall'età, e i loro SRTns effettivamente misurati quando indossano apparecchi acustici solo con amplificazione (livello di aiuto Off). La correlazione tra i valori previsti e misurati era altamente significativa ($p < 0,001$), con un coefficiente di correlazione di Pearson di 0,76. Questa correlazione è risultata altamente significativa anche se calcolata solo per i partecipanti tedeschi ($r = 0,80$, $p < 0,001$) e solo per i partecipanti giapponesi ($r = 0,71$, $p < 0,001$).

Risultati: Affidabilità Test-ritest di ACT

Tra gli utilizzatori di apparecchi acustici in questo studio, la deviazione standard test-retest intra-soggetto del paradigma ACT è stata di 0,96 dB all'interno della stessa visita e di 1,45 dB tra le visite. In confronto, la deviazione standard HINT test-retest è risultata essere 0,92-0,95 dB all'interno della stessa visita nei partecipanti al test con problemi di udito (Nielsen & Dau, 2011; Laugesen et al., 2013). Il coefficiente di correlazione intraclassa tra le due misurazioni ACT nello stesso giorno era 0,95, indicando ulteriormente un'eccellente affidabilità. Un'affidabilità test-retest così elevata dell'ACT significa che è sufficiente eseguire il test una volta per ottenere un valore ACT affidabile e clinicamente significativo. Il

tempo medio del test nello studio è risultato pari a 100 secondi, il che conferma che il test ACT è un test veloce e affidabile per uso clinico, che richiede solo pochi minuti, comprese istruzioni e consulenza.

La prima prescrizione di aiuto nel rumore basata su ACT per gli apparecchi acustici

Sulla base dei risultati dello studio clinico multi-sito descritto sopra, abbiamo sviluppato una prima prescrizione basata su ACT di impostazioni di aiuto nel rumore, compatibili con gli apparecchi acustici Oticon su Polaris R e piattaforme più recenti (ad esempio, Oticon Real e successivi), specificamente progettato per fornire un primo adattamento ottimizzato delle impostazioni MSI ai singoli utenti. La prescrizione considera i tre predittori più significativi della capacità di sentire la voce nel rumore osservati nello studio clinico, con il valore ACT come contributore principale, il PTA come secondo contributore maggiore e l'età come contributore minore. Come illustrato nella Figura 10, il livello di aiuto nel rumore prescritto a un utente di una data età con un valore ACT disponibile dipenderà quindi dalla gravità della perdita di contrasto, misurata con ACT, e della perdita di udibilità, misurata con l'audiogramma. Ciò fornirà all'audiologo un punto di partenza più preciso, obiettivo e personalizzato per le impostazioni disponibili nella schermata MoreSound Intelligence del software di adattamento Genie 2 per le funzionalità MSI che contribuiscono maggiormente a fornire il contrasto tra voce e rumore.

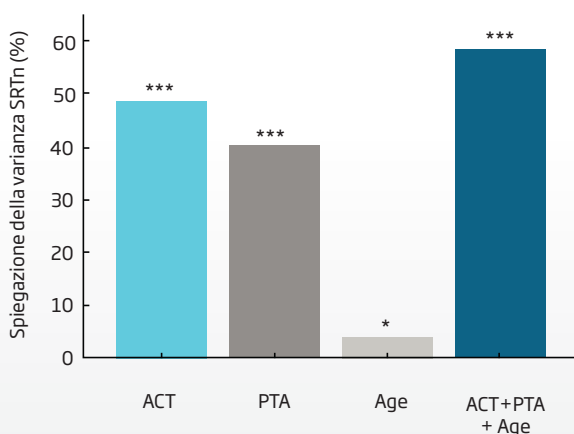


Figura 8: percentuale della varianza negli SRTns spiegata da ACT, PTA ed età, utilizzati da soli o in combinazione.

*** Modello con forte significatività statistica ($p < 0,001$).

* Modello con debole significatività statistica ($p < 0,05$).

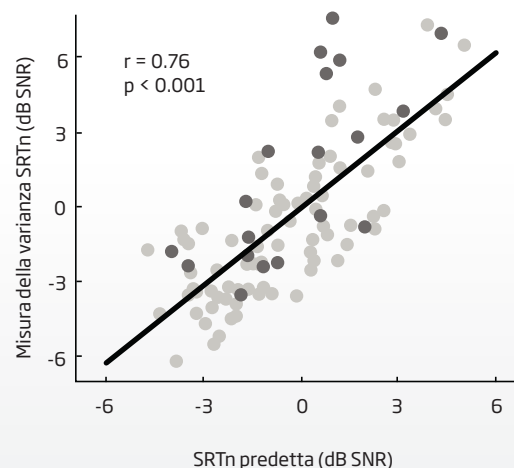


Figura 9: Relazione tra gli SRTns di 100 utilizzatori di apparecchi acustici previsti in base al loro audiogramma, valori ACT ed età, e gli SRTns misurati effettivamente quando indossano apparecchi acustici solo con amplificazione (livello di aiuto Off). I partecipanti tedeschi e giapponesi sono indicati rispettivamente da cerchi grigio chiaro e grigio scuro.

Risultati: vantaggi derivanti dall'utilizzo di una prescrizione di aiuto nel rumore basata su ACT

Infine, abbiamo voluto verificare che sia effettivamente possibile utilizzare questa prima prescrizione personalizzata delle impostazioni dell'aiuto nel rumore MSI per fornire il giusto contrasto tra voce e rumore per utenti con diversi gradi di capacità di sentire la voce nel rumore. Per testarlo, abbiamo innanzitutto utilizzato la formula di prescrizione definita basata su ACT, PTA ed età per classificare gli utenti dello studio clinico multisito di cui sopra in tre gruppi:

- Un primo gruppo con buone capacità di sentire la voce nel rumore. Ai 15 utenti di questo gruppo viene prescritto un livello di aiuto MSI inferiore a quello predefinito, verso la curva "Basso" nella Figura 7.
- Un secondo gruppo con discreta capacità di sentire la voce nel rumore. Ai 51 utenti di questo gruppo viene prescritto il livello di aiuto MSI predefinito moderato, corrispondente alla curva "Moderato" nella Figura 7.
- Un terzo gruppo con scarsa capacità di sentire la voce nel rumore. Ai 34 utenti di questo gruppo viene prescritto un livello di aiuto MSI più elevato rispetto a quello predefinito, verso la curva "Alta" nella Figura 7.

Abbiamo quindi confrontato il modo in cui gli SRTns di questi tre gruppi di utenti sono cambiati quando misurati con 4 diversi livelli di aiuto MSI (Off, Basso, Moderato e

Alto), corrispondenti ai diversi livelli di aiuto illustrati nella Figura 7.

Questi SRTns sono mostrati nella Figura 11. L'area grigia nella figura mostra la gamma di prestazioni di giovani ascoltatori con perdita di udito. Idealmente, il giusto "dosaggio" di aiuto nel rumore negli apparecchi acustici dovrebbe essere appena sufficiente a portare gli utenti all'interno di questo intervallo, in modo che la loro comprensione del parlato nel rumore rientri nell'intervallo uditivo normale, senza la necessità di elaborare il suono in arrivo più del necessario.

- Per il gruppo di utenti con una buona capacità di sentire la voce nel rumore (pannello sinistro), il livello di aiuto MSI basso è sufficiente per raggiungere il range di udito normale.
- Per il gruppo di utenti con discreta capacità di sentire la voce nel rumore (pannello centrale), il livello di aiuto Basso non è sufficiente ed è necessario il livello di aiuto MSI Moderato predefinito per riportare gli utenti entro il range di udito normale.
- Per il gruppo di utenti con scarsa capacità di sentire la voce nel rumore (pannello di destra), il livello di aiuto MSI alto è necessario per portare gli utenti il più vicino possibile al range di udito normale. Il fatto che in questo gruppo vi sia ancora un certo divario per raggiungere prestazioni normali sottolinea l'importanza di fornire a questi utenti quanto più aiuto possibile in situazioni complesse di voce nel rumore.



Figura 10: Quando si utilizza una prescrizione basata su ACT, il livello di aiuto nel rumore fornito a un singolo utente dipenderà sia dalla perdita di udibilità che dalla gravità della perdita di contrasto.

Questi risultati forniscono la prova di un beneficio oggettivo nel prescrivere diversi livelli di aiuto nel rumore in base all'ACT, all'audiogramma e all'età. Dimostrano che la stima della perdita di contrasto di un utente con ACT è clinicamente utile per l'adattamento dell'apparecchio acustico oltre a stimare la perdita di udibilità con l'audiogramma. ACT aiuta a determinare, su base individuale, quanto contrasto aggiuntivo tra voce e rumore l'apparecchio acustico dovrebbe creare affinché l'utente abbia una comprensione del parlato sufficientemente assistita nel rumore, senza elaborare la scena sonora in entrata più del necessario. In altre parole, l'ACT ci consente di determinare il dosaggio appropriato dell'aiuto aggiuntivo nel rumore fornito dall'apparecchio acustico. Idealmente, questo dosaggio dovrebbe essere sufficientemente elevato da consentire al cervello dell'utente di elaborare il parlato nel rumore nel modo più semplice possibile. Inoltre, non dovrebbe essere superiore al necessario per limitare il rischio di effetti collaterali, poiché alcuni utenti potrebbero essere più sensibili di altri alla forte elaborazione del suono in entrata.

Utilizzo di ACT per l'adattamento degli apparecchi acustici nella pratica

Il test ACT è ora disponibile nelle apparecchiature diagnostiche Interacoustics, MedRx e GSI (chiedi la disponibilità al tuo fornitore locale). In una prossima versione del software di adattamento Oticon Genie 2, la prima prescrizione ACT basata sull'evidenza sarà completamente integrata nel flusso di adattamento. L'operatore sanitario avrà la possibilità di scegliere la personalizzazione basata su ACT. Se un valore ACT è disponibile nel database utenti dell'operatore sanitario, verrà letto direttamente dal software di adattamento. L'operatore sanitario avrà anche la possibilità di inserire manualmente un valore ACT. Le impostazioni di aiuto nel rumore prescritte verranno quindi applicate automaticamente all'adattamento dell'apparecchio acustico. Se viene scelto un adattamento basato su ACT, le impostazioni di primo adattamento nella schermata MoreSound Intelligence in Genie 2 verranno quindi regolate per riflettere le difficoltà di sentire la voce nel rumore previste oggettivamente dell'utente, pur rimanendo regolabili per la regolazione fine se necessario. Quando si utilizza la personalizzazione basata su ACT, si prevede che circa il 50% degli utenti di apparecchi acustici riceverà un'impostazione MSI diversa da quella predefinita, offrendo così un punto di partenza migliore per l'aiuto nel rumore a un'ampia percentuale di utenti, soprattutto a quelli con difficoltà maggiore nel rumore.

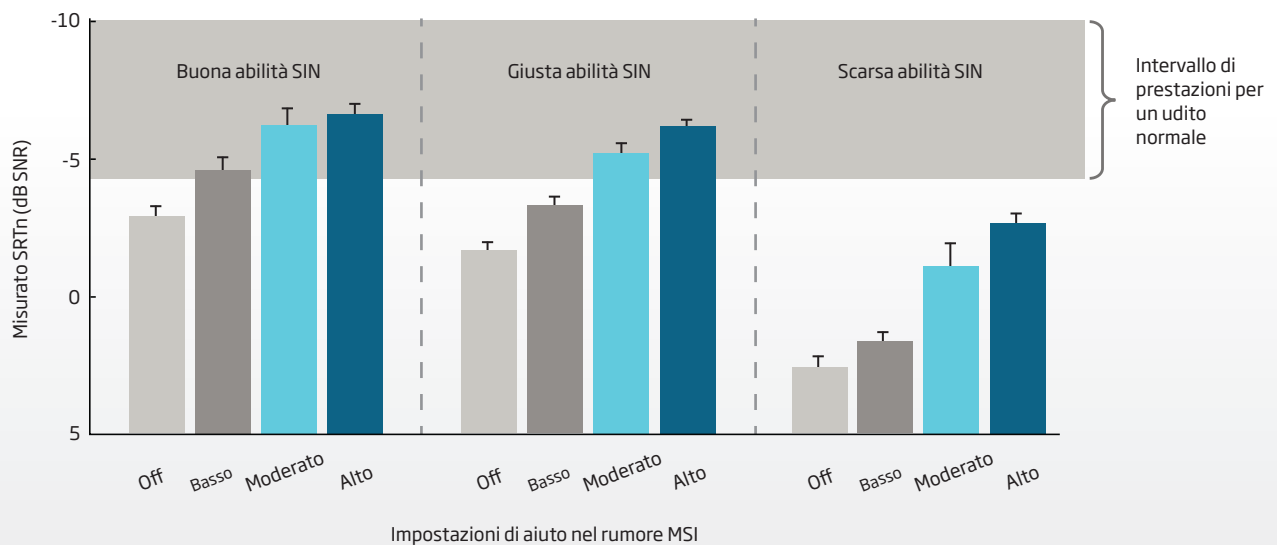


Figura 11: SRTns misurati con 4 diversi livelli di aiuto MSI negli utenti di apparecchi acustici classificati in tre gruppi in base alla loro capacità di parlare nel rumore (SIN) prevista da ACT, PTA ed età. L'area grigia indica la gamma di prestazioni dei giovani ascoltatori con udito normale senza apparecchi acustici. Le barre di errore mostrano l'errore standard della media.

Conclusioni

Sviluppato e ottimizzato attraverso oltre un decennio di ricerca scientifica, il test della soglia di contrasto udibile (ACT) è un test diagnostico rapido, obiettivo e indipendente dalla lingua che aiuta a quantificare la capacità di sentire la voce nel rumore. Può essere eseguito indipendentemente dalla lingua madre o dalla competenza linguistica di una persona, utilizzando la stessa attrezzatura diagnostica utilizzata per l'audiometria tonale e con una procedura altrettanto semplice da usare. Il primo studio clinico internazionale su larga scala con ACT ha confermato la sua relazione altamente significativa con le prestazioni della voce nel rumore in contesti ecologicamente validi in diverse popolazioni cliniche e il suo potere predittivo superiore della capacità di sentire la voce nel rumore rispetto al solo audiogramma. Mentre l'audiogramma è attualmente utilizzato principalmente per prescrivere il guadagno dell'apparecchio acustico, l'aggiunta della misurazione di un singolo ACT ora consente una prescrizione obiettiva e basata sull'evidenza di funzionalità avanzate di aiuto nel rumore. Negli apparecchi acustici Oticon sulla piattaforma Polaris R e versioni successive, l'integrazione della prima regola di prescrizione ACT nel software di adattamento Genie 2 consentirà un primo adattamento personalizzato automatico dell'elaborazione avanzata del segnale che fornisce il contrasto tra voce e rumore. Con ACT, gli audioprotesisti dispongono di uno strumento affidabile per affrontare, sia nei processi diagnostici che di adattamento, il problema numero uno delle persone con perdita uditiva: sentire nel rumore.

Ringraziamenti

Desideriamo ringraziare i nostri collaboratori scientifici dell'Università di Scienze Applicate di Lubeca, Kaoru Ogawa (General Incorporated Association Shinden-Ogawa Audiology and Hearing Aid Laboratory (GIASO), OTO Clinic Tokyo (OTO), Keio University School of Medicine (KU)), Seiichi Shinden (GIASO, OTO, KU, Ospedale Saiseikai Utsunomiya (SUH)), Takanori Nishiyama (GIASO, OTO, KU), Tsubasa Kitama (GIASO, OTO, KU) e Daisuke Suzuki (GIASO, OTO, KU, SUH) per il loro prezioso contributo alla ricerca presentata in questo whitepaper, così come i seguenti colleghi di Demant: Johannes Zaar, Lisbeth Birkelund Simonsen, Gary Jones, Chiemi Tanaka, Raul Sanchez Lopez, Marianna Vatti e Thomas Behrens.

Riferimenti

- Andersen, A. H., Santurette, S., Pedersen, M. S., Alickovic, E., Fiedler, L., Jensen, J., & Behrens, T. (2021). Creating clarity in noisy environments by using deep learning in hearing aids. *Seminars in Hearing* 42(3), 260-281.
- Bernstein, J. G. W., Mehraei, G., Shamma, S., Gallun, F. J., Theodoroff, S. M., & Leek, M. R. (2013). Spectrotemporal modulation sensitivity as a predictor of speech intelligibility for hearing-impaired listeners. *J. Am. Acad. Audiol.* 124(4), 293-306.
- Bernstein, J. G. W., Danielsson, H., Hällgren, M., Stenfelt, S., Rönnerberg, J., & Lunner, T. (2016) Spectrotemporal modulation sensitivity as a predictor of speech-reception performance in noise with hearing aids. *Trends in Hearing* 20, 1-17.
- Hagerman, B., & Olofsson, Å. (2004). A method to measure the effect of noise reduction algorithms using simultaneous speech and noise. *Acta Acustica United with Acustica*, 90(2), 356-361.
- Humes, L. E. (2007) The contributions of audibility and cognitive factors to the benefit provided by amplified speech to older adults. *J. Am. Acad. Audiol.* 18, 590-603.
- Jensen, J., & Pedersen, M. S. (2015). Analysis of beamformer directed single-channel noise reduction system for hearing aid applications. 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 5728-5732.
- Johannesen, P. T., Pérez-González, P., Lopez-Poveda, E. A. (2014). Across-frequency behavioral estimates of the contribution of inner and outer hair cell dysfunction to individualized audiometric loss. *Frontiers in Neuroscience* 8.
- Joiko, J., Bohnert, A., Strieth, S., Soli, S. D., & Rader, T. (2021). The German hearing in noise test. *Int. J. Audiol.* 60(11), 927-933.
- Jorgensen, L., & Novak, M. (2020). Factors influencing hearing aid adoption. *Seminars in Hearing* 41(1), 6-20.
- Keidser, G., Naylor, G., Brungart, D. S., Caduff, A., Campos, J., Carlile, S., Carpenter, M. G., Grimm, G., Hohmann, V., Holube, I., Launer, S., Lunner, T., Mehra, R., Rapport, F., Slaney, M., & Smeds, K. (2020). The quest for ecological validity in hearing science: What it is, why it matters, and how to advance it. *Ear and Hearing* 41, 5S.
- Keidser, G., Dillon, H., Flax, M., Ching, T., & Brewer, S. (2011). The NAL-NL2 prescription procedure. *Audiology Research* 1(1), e24.
- Kjems, U., & Jensen, J. (2012). Maximum likelihood based noise covariance matrix estimation for multimicrophone speech enhancement. 2012 Proceedings of the 20th European signal processing conference (EUSIPCO), 295-299.
- Kodera, K., Hosoi, H., Okamoto, M., Manabe, T., Kanda, Y., Shiraishi, K., ... & Ishikawa, K. (2016). Guidelines for the evaluation of hearing aid fitting (2010). *Auris Nasus Larynx* 43(3), 217-228.
- Laugesen, S., Rønne, F. M., Jensen, N. S., & Sorgenfrei, M. G. (2013). Validation of a spatial speech-in-speech test that takes signal-to-noise ratio (SNR) confounds into account. *Proceedings of the International Symposium on Auditory and Audiological Research* 4, 397-404.
- Le Goff, N., Jensen, J., Pedersen, M. S., & Callaway, S. L. (2016). An introduction to OpenSound Navigator. Oticon Whitepaper. Retrieved from oticon.global/evidence.
- Lopez-Poveda, E. A. (2014). Why do I hear but not understand? Stochastic undersampling as a model of degraded neural encoding of speech. *Front. Neurosci.* 8, 348.
- Manchaiah, V., Picou, E. M., Bailey, A., & Rodrigo, H. (2021). Consumer ratings of the most desirable hearing aid attributes. *J. Am. Acad. Audiol.* 32(8), 537-546.
- Mehraei, G., Gallun, F. J., Leek, M. R., & Bernstein, J. G. W. (2014). Spectro-temporal modulation sensitivity for hearing-impaired listeners: Dependence on carrier center frequency and the relationship to speech intelligibility. *J. Acoust. Soc. Am.* 136(1): 301-316.
- Nielsen, J. B., & Dau, T. (2011). The Danish hearing in noise test. *Int. J. Audiol.* 50(3), 202-208.
- Nilsson, M., Soli, S. D., & Sullivan, J. A. (1994). Development of the Hearing in Noise Test for the measurement of speech reception thresholds in quiet and in noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 95(2), 1085-1099.

- Plomp, R. (1978). Auditory handicap of hearing impairment and the limited benefit of hearing aids. *J. Acoust. Soc. Am.* 63(2), 533-549.
- Plomp, R. (1986). A signal-to-noise ratio model for the speech reception threshold of the hearing impaired. *J. Speech Hear. Res.* 29(2), 146-154.
- Shiroma, M., Iwaki, T., Kubo, T., & Soli, S. (2008). The Japanese hearing in noise test. *Int. J. Audiol.*, 47(6), 381-382.
- Smootenburg, G. F. (1992). Speech reception in quiet and in noisy conditions by individuals with noise-induced hearing loss in relation to their tone audiogram. *J. Acoust. Soc. Am.* 91(1), 421-437.
- Strelcyk, O., & Dau, T. (2009). Relations between frequency selectivity, temporal fine-structure processing, and speech reception in impaired hearing. *J. Acoust. Soc. Am.* 125(5): 3328-3345.
- Thorup, N., Santurette, S., Jørgensen, S., Kjærboel, E., Dau, T., & Friis, M. (2016). Auditory profiling and hearing-aid satisfaction in hearing-aid candidates. *Danish Medical Journal* 63(10).
- Yamada, H., Shinden, S., Ota, H., Suzuki, D., Minami, R., Matsui, Y., ... & Ogawa, K. (2020). Hearing aid outpatient clinic that incorporates Utsunomiya method auditory rehabilitation. *Journal of Otolaryngology of Japan*, 123(12), 1380-1387.
- Zaar, J., Simonsen, L. B., Dau, T., Laugesen, S. (2023a). Toward a clinically viable spectro-temporal modulation test for predicting supra-threshold speech reception in hearing-impaired listeners. *Hear. Res.* 427: 108650.
- Zaar, J., Simonsen, L. B., & Laugesen, S. (2023b) A spectro-temporal modulation test for predicting speech reception in hearing-impaired listeners with hearing aids. Retrieved from psyarxiv.com/5fk6s.
- Zaar, J., Simonsen, L. B., Sanchez-Lopez, R., & Laugesen, S. (2023c). The Audible Contrast Threshold (ACT™) test: A clinical spectro-temporal modulation detection test. Retrieved from [medRxiv](https://medrxiv.org/lookup/doi/10.1101/2023.08.14.23288888).
- Zaar, J. et al. (2023d). To be submitted.

