

# Métodos baseados em Sorteio para Seleção de Canais de Estimulação em Implantes Cocleares

Alisson L. Furlani, Márcio H. Costa e Stephan Paul

**Resumo**— Este trabalho apresenta três novas estratégias para seleção de canais de estimulação em implantes cocleares. O princípio de funcionamento é baseado em sorteio aleatório, seguindo uma função densidade de probabilidade cujo objetivo é priorizar canais com maior potência e penalizar a proximidade espaço-temporal de canais ativadas. Comparações utilizando critérios objetivos de inteligibilidade e experimentos psicoacústicos com normo-ouvintes e fala processada por *vocoder* resultaram em maiores percentuais de inteligibilidade em relação à estratégia comercial *Advanced Combination Encoder*. Como resultado, verificou-se a possibilidade de obter percentuais de inteligibilidade acima de 90% com o acionamento de apenas um canal a cada período de estimulação.

**Palavras-Chave**— Seleção de canais, Implante coclear, Inteligibilidade da fala.

**Abstract**— This work presents three new methods for stimulation channel selection in cochlear implants. The proposed methods are based on random selection, following a probability density function that aims to prioritize high magnitude channels and to penalize spatio-temporal contiguity of activated channels. Comparisons using speech intelligibility objective criteria and psychoacoustic experiments with normal hearing volunteers and vocoded speech resulted higher intelligibility scores than for the *Advanced Combination Encoder* strategy. As a result, it is possible to achieve intelligibility scores higher than 90% with only one active channel at each stimulation period.

**Keywords**— Channel selection, Cochlear implant, Speech intelligibility.

## I. INTRODUÇÃO

A perda auditiva, seja completa ou parcial, dificulta a comunicação e acarreta consequências negativas ao bem-estar social, funcional e psicológico da pessoa deficiente [1]. Na maioria dos casos de perda auditiva neurossensorial a lesão reside na cóclea, reduzindo ou impedindo a excitação do nervo auditivo [2]. Quando a perda auditiva é de grau severo a profundo, o implante coclear (IC) é a tecnologia mais apropriada para restaurar a audição. No IC, um conjunto de eletrodos é inserido cirurgicamente no interior da cóclea para substituir a parte não-funcional e excitar diretamente as terminações do nervo auditivo com pulsos elétricos [3]. Como resultado, o IC pode restaurar parcialmente a percepção de sons e fala, sendo considerado como a prótese neural de maior sucesso na história da medicina [2].

O processamento de sinais realizado no IC, que recebe o nome de estratégia de codificação, desempenha um papel importante na potencialização da capacidade de percepção sonora e consequentemente comunicação dos usuários de implantes cocleares. Nas últimas décadas, novas e mais

avançadas técnicas têm resultado em aumentos progressivos no desempenho dos usuários de ICs [4]. Uma estratégia que revolucionou a área de IC foi a técnica *Continuous Interleaved Sampling* (CIS) [5], que conseguiu elevar consideravelmente a inteligibilidade de fala e continua sendo utilizada nos dias atuais. Outra estratégia de estimulação bastante popular é a *Advanced Combination Encoder* (ACE) [6]. A estratégia ACE é semelhante à CIS, com a diferença de que a cada período de estimulação, apenas os  $N$  eletrodos associados aos canais com maior magnitude, dos  $M$  disponíveis, são acionados. Por esse motivo, essa estratégia é classificada como “ $N$ -of- $M$ ”. A redução do número de canais acionados diminui a interação mútua, causada pelo espalhamento de corrente que ocorre no interior da cóclea. Como consequência, espera-se um aumento de inteligibilidade da fala [7] em relação ao CIS. Adicionalmente, ocorre diminuição do consumo de energia, aumentando a autonomia (duração da bateria) do IC. Essa característica é importante, pois o consumo de energia em ICs ainda é elevado e a redução do consumo é um tema de grande interesse atual [8].

A propriedade intrínseca de espalhamento elétrico na cóclea e a necessidade de diminuir o consumo de energia têm motivado o estudo de novas estratégias de codificação para possibilitar a redução de canais. Nesse contexto, na estratégia *Psychoacoustic Advanced Combination Encoder* (PACE) é proposta a utilização de um modelo psicoacústico de mascaramento entre bandas espectrais na seleção dos canais a serem estimulados [9]. Em função dos resultados obtidos, a empresa Cochlear<sup>®</sup> passou a empregar esse conceito na estratégia MP3000, utilizada em alguns modelos de seus equipamentos. A técnica *Ideal Binary Mask* (IdBM) estabelece um limiar mínimo para a razão sinal-ruído (SNR) de um determinado canal para que o mesmo seja selecionado para ativação [10]. Por outro lado, a estratégia *Matching Pursuit* (MP) seleciona os canais que melhor reconstruem o espectro do sinal, maximizando a correlação entre os espectros do sinal original e o do codificado [11]. Em [12] foi proposta uma estratégia de seleção de canais baseada em sorteio aleatório. Apesar de interessante não são apresentados resultados de inteligibilidade e tampouco apresentadas comparações com métodos estabelecidos.

Neste trabalho, são propostos três novos métodos para seleção de canais, chamados de *Random Channel Selection* (RCS), *Weighted Random Channel Selection* (WRCS) e *Average-wise Random Channel Selection* (ARCS), baseados em sorteio aleatório. Esses métodos têm como objetivo a maximização da inteligibilidade da fala associada a muito baixo consumo de energia, permitindo a utilização de menos de quatro canais a cada período de estimulação. Essa condição, caracteriza situações nas quais o usuário deseja estender o período de utilização do aparelho além da capacidade nominal da bateria em uso normal. Os métodos propostos diferem de [12] por utilizarem uma função de densidade de probabilidade dinâmica para controlar a probabilidade de seleção de cada canal.

Alisson L. Furlani, Márcio H. Costa e Stephan Paul, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, e-mails: alisson.furlani@gmail.com, costa@eel.ufsc.br e stephan.paul@ufsc.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, CNPq (315020/2018-0), FAPESC e FINEP.

## II. PROPOSTA DE NOVOS MÉTODOS PARA SELEÇÃO DE CANAIS EM IMPLANTES COCLEARES

Os métodos propostos baseiam-se em uma estratégia de seleção de canais caracterizada pelo favorecimento do espalhamento dos elementos ativos ao longo do conjunto de eletrodos, mas mantendo prioridade de bandas com maior magnitude. Para promover a diversificação dos canais, a seleção é realizada de forma aleatória de acordo com uma função de densidade de probabilidade (FDP) autoajustável.

Os métodos propostos englobam uma cadeia de pré-processamento semelhante à dos métodos convencionais encontrados na literatura (como o ACE). O sinal sonoro captado pelo microfone é processado por um banco de filtros e decomposto em um conjunto de  $M$  canais passa-banda. A cada período de estimulação  $\lambda$ , é calculada a magnitude da envoltória do sinal em cada canal  $m$ , representada por  $e(\lambda, m)$ , em que  $\lambda$  é a variável de tempo discreto e  $m = 1, 2, \dots, M$ . O cálculo da envoltória usualmente é realizado por um processo de filtragem passa-baixa do módulo do sinal de fala ou pela utilização da transformada de Hilbert.

A estratégia de seleção de canais é aplicada a cada período de estimulação, quando um conjunto de  $M$  magnitudes da envoltória está disponível para a estimulação da cóclea. Nesse momento, o conjunto de magnitudes associadas aos  $M$  canais é analisado e as amostras que apresentam magnitude inferior a um limiar pré-determinado  $\gamma$  são descartadas. Esse procedimento tem como finalidade eliminar a probabilidade de seleção de canais com pouca ou nenhuma potência. Desta forma:

$$a(m) = \begin{cases} 0 & \text{se } e(\lambda, m) < \gamma \\ e(\lambda, m) & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (1)$$

para  $m = 1, 2, \dots, M$ .

A seguir, é iniciada uma sequência de  $i = 1, \dots, N$  sorteios aleatórios, baseados na descrição de FDP discretas que determinam a importância de cada um dos  $M$  canais em função de suas magnitudes. Finalizado o processo de sorteio, as magnitudes de estimulação dos eletrodos são definidas como:

$$s(\lambda, m) = \begin{cases} a(m) & \text{se } m \text{ selecionado} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (2)$$

resultando em apenas  $N$  canais habilitados a cada período de estimulação. A seguir são apresentadas três propostas de FDP para a definição da importância dos  $M$  canais.

### A. Random Channel Selection

A estratégia RCS é baseada na seguinte estrutura de FDP:

$$f(m) = \frac{c(m)a(m)^\beta}{\sum_{k=1}^M c(k)a(k)^\beta}, \quad (3)$$

em que  $c(m)$  e  $\beta$  são parâmetros utilizados para conformar a probabilidade de seleção. Note que quando o expoente  $\beta$  for maior que 1, ocorre uma ênfase dos canais com maior magnitude, aumentando a sua probabilidade de seleção.

Os parâmetros  $c(m)$  são definidos de forma a reduzir a probabilidade de seleção de canais próximos e de repetição da seleção de um mesmo canal em instantes de tempo consecutivos. Essa estratégia é implementada para que os canais selecionados não apresentem um elevado agrupamento espaço-temporal.

Inicialmente, os parâmetros  $c(m)$  são inicializados com o valor unitário de forma a configurar uma distribuição uniforme. Para cada período de estimulação  $\lambda$ , uma sequência de  $i = 1, \dots, N$  sorteios aleatórios é realizada. Após cada um desses sorteios dois processos de atualização são executados: (a) atualização para o próximo sorteio  $i$ ; e (b) atualização para o próximo período de estimulação  $\lambda$ .

Assumindo-se que um determinado canal  $m = z$  tenha sido selecionado no sorteio, então o novo conjunto de coeficientes para próximo sorteio é definido por

$$c(m) = \begin{cases} \alpha_1 c(m) & \text{se } m = z - 1 \text{ ou } m = z + 1 \\ 0 & \text{se } m = z \\ c(m) & \text{se } m < z - 1 \text{ ou } m > z + 1 \end{cases}, \quad (4)$$

de forma que a probabilidade de seleção do mesmo canal passa a ser nula no próximo sorteio e as probabilidades dos canais (especialmente) contíguos é diminuída visto que  $0 < \alpha_1 < 1$ .

Conjuntamente ao processo de atualização de  $c(m)$  é realizado o processo de conformação de inicialização dos parâmetros que serão utilizados no próximo período de estimulação  $\lambda + 1$ . Inicialmente definida como uma distribuição uniforme, a equação de atualização é dada por:

$$d(m) = \begin{cases} \alpha_2 d(m) & \text{se } m = z - 1 \text{ ou } m = z + 1 \\ \alpha_3 d(m) & \text{se } m = z \\ d(m) & \text{se } m < z - 1 \text{ ou } m > z + 1 \end{cases}, \quad (5)$$

em que  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  reduzem, respectivamente, a chance de seleção de canais vizinhos e do canal selecionado no próximo período de estimulação  $\lambda + 1$ . Ao final dos  $N$  sorteios então  $c(m) = d(m)$ . O pseudocódigo para implementação do método RCS é apresentado na Tabela I.

TABELA I. PSEUDOCÓDIGO DA ESTRATÉGIA RCS.

<b>Estratégia RCS</b>	
<b>Entrada:</b>	$e(\lambda, m)$ e $c(m)$ para $m=1, \dots, M$ , $\gamma, \beta, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$
<b>Saída:</b>	$s(\lambda, m), c(m)$ para $m=1, \dots, M$
1	Remove as magnitudes com pouca informação, conforme (1)
2	Inicializa os parâmetros $d(m)$ para $m=1, \dots, M$
3	<b>Para</b> $i=1, \dots, N$ <b>faça</b>
4	Atualiza a FDP conforme (3)
5	Sorteia um canal aleatoriamente a partir da FDP em (3)
6	Atualiza a saída conforme (2)
7	Atualiza os parâmetros de seleção conforme (4) e (5)
8	<b>Fim</b>

### B. Weighted Random Channel Selection

De acordo com [13], algumas faixas de frequência do espectro são mais relevantes para a inteligibilidade da fala. Baseado nessa observação, o método WRCS utiliza os parâmetros  $c(m)$  para priorizá-las. Para tanto, é utilizada a graduação apresentada na Tabela B.1 em [14], utilizada na métrica *Normalized Covariance Metric* (NCM) [15].

A estrutura de FDP utilizada é a mesma da estratégia RCS, apresentada na Eq. (3), porém com  $\beta = 1$ . Para evitar a repetição de canais em um mesmo período de estimulação, os parâmetros  $c(m)$  são atualizados a cada iteração por:

$$c(m) = \begin{cases} 0 & \text{se } m = z \\ c(m) & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

A Tabela II sumariza as etapas do método WRCS.

TABELA II. PSEUDOCÓDIGO DA ESTRATÉGIA WRCS.

<b>Estratégia WRCS</b>	
<b>Entrada:</b>	$e(\lambda, m)$ para $m=1, \dots, M$
<b>Saída:</b>	$s(\lambda, m)$ para $m=1, \dots, M$
1	Define os parâmetros $c(m)$ conforme Tabela B.1 em [14]
2	<b>Para</b> $i=1, \dots, N$ <b>faça</b>
3	Sorteia um canal a partir da FDP em (3), para $\beta = 1$
4	Atualiza a saída conforme (2)
5	Atualiza os parâmetros de seleção conforme (6)
6	<b>fim</b>

### C. Average-wise Random Channel Selection

O método ARCS tem como objetivo reduzir a diferença média entre  $e(\lambda, m)$  e  $s(\lambda, m)$  em uma janela de  $K$  instantes de tempo ( $s(\lambda, m)$  é inicializado com zeros para tempos passados):

$$\bar{c}(m) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [e(\lambda - k, m) - s(\lambda - k, m)] \quad (7)$$

Em sequência é realizada uma transformação linear dos resultados de (7) para uma faixa entre 0 e 1, como forma de aumentar a probabilidade de seleção dos canais com maior potência, mas que foram pouco selecionados nas últimas  $K$  iterações:

$$c(m) = \frac{\bar{c}(m) - \min\{\bar{c}(m)\}}{\max\{\bar{c}(m)\} - \min\{\bar{c}(m)\}} \quad (8)$$

Finalmente, a FDP da ARCS é então definida a partir da normalização dos parâmetros  $c(m)$ , conforme:

$$f(m) = \frac{c(m)}{\sum_{k=1}^M c(k)} \quad (9)$$

Assim como no método WRCS, a repetição de canais em um mesmo período de estimulação é evitada através da atualização de  $c(m)$  conforme (6). A Tabela 3 apresenta o pseudocódigo da estratégia ARCS.

TABELA III. PSEUDOCÓDIGO DA ESTRATÉGIA ARCS.

<b>Estratégia ARCS</b>	
<b>Entrada:</b>	$e(\lambda, m)$ para $m=1, \dots, M$ e $\lambda \in \{\lambda, \lambda-1, \dots, \lambda-K\}$
<b>Saída:</b>	$s(\lambda, m)$ para $m=1, \dots, M$
1	Define os parâmetros $c(m)$ conforme (7) e (8)
2	<b>Para</b> $i=1, \dots, N$ <b>faça</b>
3	Atualiza a FDP conforme (9)
4	Sorteia um canal aleatoriamente a partir da FDP em (9)
5	Atualiza a saída conforme (2)
6	Atualiza os parâmetros de seleção conforme (6)
7	<b>Fim</b>

## III. AVALIAÇÃO OBJETIVA

Nessa seção é realizada uma comparação de desempenho entre os métodos propostos e estratégias já existentes utilizando as métricas *Normalized Covariance Metric* (NCM) [15] e *Short-*

*Term Objective Intelligibility* (STOI) [16] [17], para estimação de inteligibilidade. Ambas são altamente correlacionados com a inteligibilidade experimentada por normo-ouvintes submetidos à fala processada por *vocoders* [18], como também com resultados experimentais envolvendo usuários de IC [19].

São realizadas comparações entre as estratégias propostas e 5 métodos disponíveis na literatura da área: CIS [5], ACE [6], MP [10], IdBM [11], AWV [12]. Versões modificadas das estratégias IdBM e MP, denominadas de IdBM<sub>MOD</sub> e MP<sub>MOD</sub>, foram implementadas de forma a impor o limite máximo de  $N$  canais habilitados.

### A. Configuração de Parâmetros

Foram utilizados dois conjuntos de parâmetros para o método RCS. No primeiro, identificado simplesmente por RCS, foram utilizados parâmetros  $\beta$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  e  $\gamma$  de forma que não ocorra redução da probabilidade da seleção de canais próximos nem a diminuição da probabilidade de repetição de canais em instantes de tempo consecutivos. No segundo, identificado como RCS<sub>OPT</sub>, foram utilizados parâmetros obtidos através de busca exaustiva em uma coleção pré-determinada de valores de forma a maximizar a métrica NCM para 25 sinais de fala da lista foneticamente balanceada proposta em [20]. As configurações ótimas para  $M \in \{1, 2, 4, 6\}$  foram determinadas pelas medianas das NCMs obtidas a partir da seguinte grade de possibilidades (obtida através de uma busca preliminar):  $\beta \in \{1, 1,5, 2\}$ ,  $\alpha_1 \in \{0,8, 0,5, 0,2\}$ ,  $\alpha_2 \in \{0,8, 0,5, 0,2\}$ ,  $\alpha_3 \in \{0,5, 0,25, 0,01\}$  e  $\gamma \in \{0, 0,0156\}$  (valor de  $\gamma$  foi definido a partir do limiar  $T$  do mapa padrão para implantes utilizado em [21]). A Tabela IV apresenta os parâmetros utilizados.

TABELA IV. PARÂMETROS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DO MÉTODO RCS.

Estratégia	$\beta$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\gamma$
RCS	1	1	1	1	0
RCS <sub>OPT</sub>	2	0,2	0,8	0,01	0,0156

### B. Sinais de Fala

Os sinais utilizados na avaliação foram obtidos do banco de falas descrito em [22] e gravados por [23] com uma frequência de amostragem ( $f_s$ ) de 11,025 kHz e resolução de 16 bits. O banco é composto por 200 sentenças em português do Brasil, separadas em 20 listas foneticamente balanceadas; em que 10 foram pronunciadas por locutores do sexo feminino e 10 por locutores do sexo masculino. Neste trabalho os áudios foram reamostrados para a  $f_s = 16$  kHz.

### C. Procedimento de Avaliação

Os 200 áudios foram processados pelas diferentes estratégias de estimulação e os sinais resultantes foram codificados por um *vocoder* tonal [11]. As estratégias CIS, ACE, MP, MP<sub>MOD</sub>, IdBM<sub>MOD</sub>, AWV, RCS, RCS<sub>OPT</sub>, WRCS e ARCS foram utilizadas, para um número de canais selecionados variando entre 1 e 12. A inteligibilidade foi avaliada pelas métricas NCM e STOI. A estratégia CIS foi utilizada como referência, visto que  $N = M = 22$ .

### D. Resultados e Discussão

As médias da inteligibilidade avaliada pelas métricas NCM e STOI para os métodos analisados são apresentadas na Fig. 1. Note que, entre as estratégias de seleção de canais, o MP<sub>MOD</sub>

apresenta o melhor desempenho. O método  $RCS_{OPT}$ , embora utilizando um procedimento mais simples, também resulta em uma inteligibilidade substancialmente superior à estratégia ACE.

A Fig. 2 apresenta uma comparação entre as medianas dos tempos de processamento para cada estratégia, considerando  $N \in \{1, 4, 8, 12\}$  canais. As estratégias MP e  $MP_{MOD}$  requerem tempo de processamento muito maior que as demais estratégias, o que pode inviabilizar sua utilização em aplicações reais.

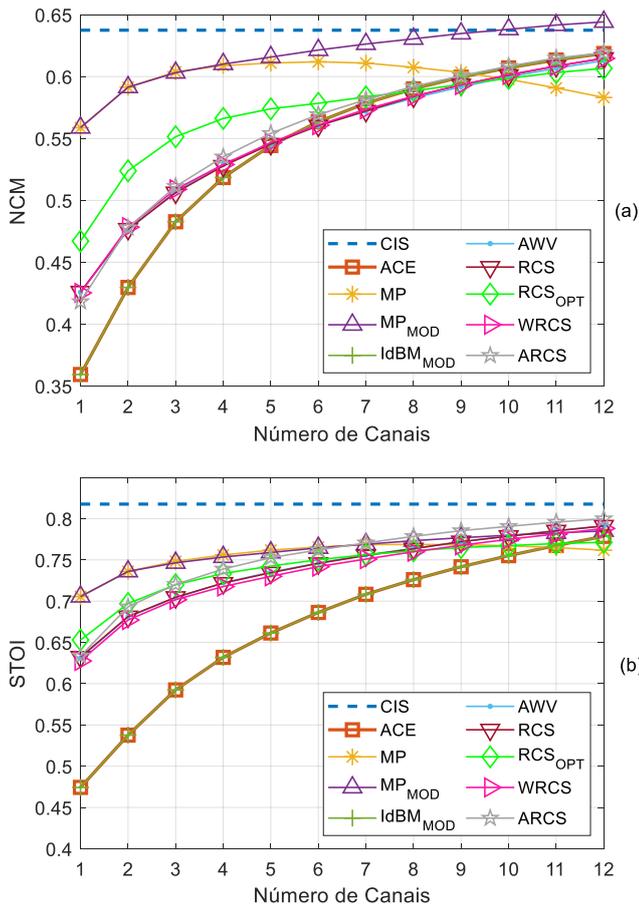


Fig. 1. Inteligibilidade média para as 200 sentenças de fala avaliadas, segundo diferentes estratégias de estimulação. (a) NCM e (b) STOI.

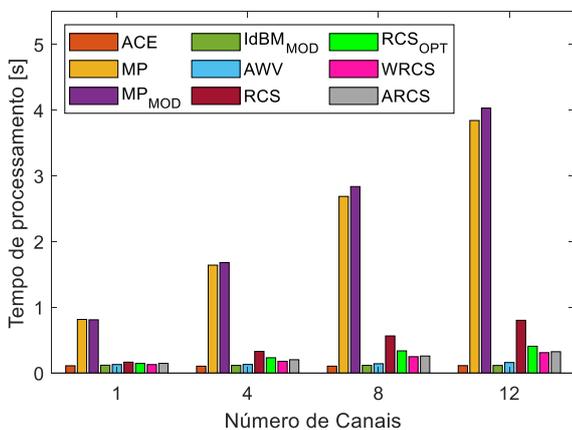


Fig. 2. Comparação entre os tempos (mediana) de processamento para as diferentes estratégias de estimulação, utilizando  $N \in \{1, 4, 8, 12\}$  canais.

#### IV. AVALIAÇÃO PSICOACÚSTICA

Nesta seção são apresentados experimentos psicoacústicos de inteligibilidade com voluntários normo-ouvintes sujeitos a fala processada por *vocoder*. Duas estratégias são avaliadas: a ACE, por se tratar de uma estratégia utilizada por ICs comerciais e; o método  $RCS_{OPT}$ , por ter apresentado o melhor desempenho entre as estratégias de baixa e média complexidade computacional.

##### A. Participantes

Onze voluntários autodeclarados como normo-ouvintes participaram do experimento. Todos os participantes preencheram o termo de consentimento livre e esclarecido, conforme o projeto número 3.723.737 aprovado pelo comitê de ética da Universidade Federal de Santa Catarina.

##### B. Procedimento

Os voluntários escutaram sinais de fala processadas pelas técnicas ACE ou  $RCS_{OPT}$ , para  $N = 1, \dots, 4$ , e sintetizadas pelo mesmo *vocoder* tonal utilizado na avaliação objetiva. Após cada sentença, os participantes foram solicitados a repetir as palavras que escutaram, sendo as corretas contabilizadas pelo aplicativo do experimento.

O banco de fala também foi o mesmo utilizado na avaliação objetiva. Duas listas, uma de cada gênero de locutor, foram aleatoriamente selecionadas para cada uma das estratégias utilizadas, resultando no total de 160 sentenças e duração aproximada de 30 minutos para o experimento completo. A apresentação das sentenças foi realizada de forma aleatória, sem repetição, evitando o favorecimento de alguma técnica, ou condição, por influência do aprendizado ou cansaço do participante.

Anteriormente à execução do experimento, uma etapa de treinamento foi realizada para adaptar o participante ao procedimento e ajustar o volume para um nível confortável de potência. Nessa etapa algumas sentenças (diferentes das utilizadas no experimento) foram apresentadas ao voluntário, sendo possibilitada a repetição e o conhecimento do conteúdo das frases. Foi utilizado um fone de ouvido Sennheiser modelo HD 202 para a reprodução dos áudios.

##### C. Resultados e Discussão

Os resultados do experimento psicoacústico são apresentados no diagrama de caixas da Fig. 3. Os valores percentuais foram obtidos a partir da razão do número de palavras corretamente repetidas pelos participantes e do total de palavras apresentadas. Na Fig. 3, as caixas ciano representam os resultados para a estratégia ACE, enquanto que as caixas vermelhas os da estratégia  $RCS_{OPT}$ . Note que o método  $RCS_{OPT}$  proporciona maiores níveis de inteligibilidade da fala que a estratégia ACE, resultando em níveis superiores a 90% de inteligibilidade mesmo utilizando somente um canal a cada período de estimulação.

A realização do teste ANOVA de dois fatores com medidas repetidas indica que há diferenças estatísticas para os resultados obtidos em relação ao número de canais e estratégia de seleção utilizada, com  $p < 0,0001$ . O teste de esfericidade de Mauchly não rejeita a hipótese nula de que as variâncias são iguais, com  $p = 0,0621$ . Porém, a análise dos resíduos através do teste de Shapiro-Wilk mostra que os dados não seguem uma distribuição normal,  $p < 0,0001$ . Os dados foram então transformados usando a transformação de arco-seno racionalizada [24],

resultando nas mesmas conclusões para o teste ANOVA e o teste de esfericidade de Mauchly, mas indicando normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk,  $p = 0,4841$ . A normalidade também foi aceita via análise visual do gráfico Q-Q dos resíduos. Finalmente, o teste-t pareado foi aplicado para verificar existência de diferença estatisticamente significativa entre as estratégias de seleção de canais, para cada número de canais. Como resultado, as distribuições de inteligibilidade obtidas para ambas as técnicas apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Os níveis de significância são apresentados na Tabela V.

Embora não represente fielmente o desempenho de usuários de implante coclear, a avaliação com normo-ouvintes utilizando sinais processados por *vocoder* indica a existência de diferença estatisticamente significativa entre o método  $RCS_{OPT}$  e a estratégia comercial ACE.

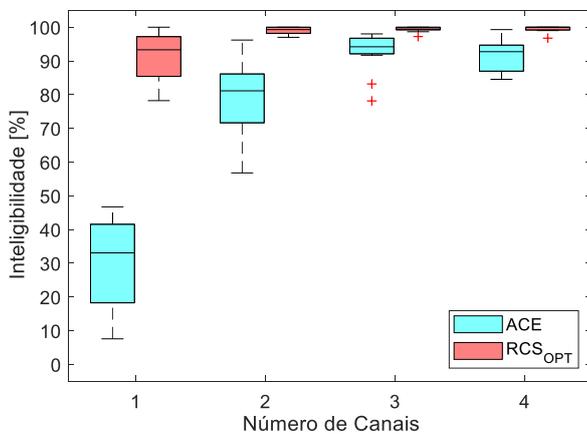


Fig. 3. Diagramas de caixas para os resultados obtidos na avaliação psicoacústica de inteligibilidade da fala por normo-ouvintes, usando fala processada por *vocoder*. Estratégias ACE (ciano, a esquerda) e  $RCS_{OPT}$  (vermelho, a direita).

TABELA V. NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DO TESTE-T PAREADO PARA A COMPARAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS ACE E  $RCS_{OPT}$ , PARA OS DIFERENTES NÚMEROS DE CANAIS.

Número de Canais	$p$
1	< 0,0001
2	< 0,0001
3	0,0003
4	< 0,0001

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a proposta de três novos métodos para a seleção de canais em implantes cocleares. O objetivo desses métodos é a diminuição do consumo de energia do implante, com preservação da inteligibilidade da fala. Os resultados obtidos, a partir de experimentos com métricas objetivas e experimentos psicoacústicos de inteligibilidade em voluntários normo-ouvintes submetidos a fala processada por *vocoder*, indicam a possibilidade de obter percentuais de inteligibilidade acima de 90% com o acionamento de apenas um canal a cada período de estimulação. Futuramente os resultados obtidos serão confrontados com experimentos em usuários de implante coclear utilizando uma interface de comunicação.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Ciorba *et al.*, "The impact of hearing loss on the quality of life of elderly adults", *Clinical Interventions in Aging*, v. 7, pp. 159-163, 2012.
- [2] J. Wolfe e E. C. Schafer, *Programming Cochlear Implants*, 2ª ed. Plural Publishing, 2015.
- [3] P. C. Loizou, "Signal-processing techniques for cochlear implants: A review of progress in deriving electrical stimuli from the speech signal", *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, v. 18, n. 3, p. 34-46, 1999.
- [4] F.-G. Zeng, "Trends in cochlear implants", *Trends in Amplification*, v. 8, n. 1, pp. 1-34, 2004.
- [5] B. S. Wilson, *et al.*, "Better speech recognition with cochlear implants", *Nature*, v. 352, n. 6332, pp. 236-238, 1991.
- [6] A. E. Vandali, *et al.*, "Speech perception as a function of electrical stimulation rate: using the nucleus 24 cochlear implant system", *Ear and Hearing*, v. 21, n. 6, pp. 608-624, 2000.
- [7] M. W. Skinner, *et al.*, "Speech recognition with the Nucleus 24 SPEAK, ACE, and CIS speech coding strategies in newly implanted adults", *Ear and Hearing*, v. 23, n. 3, pp. 207-223, 2002.
- [8] J. Wouters, H. J. McDermott e T. Francart, "Sound coding in cochlear implants: from electric pulses to hearing", *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 32, n. 2, pp. 67-80, 2015.
- [9] W. Nogueira, *et al.*, "A psychoacoustic 'N-of-M'-type speech coding strategy for cochlear implants", *EURASIP Journal of Applied Signal Processing*, v. 2005, n. 18, pp. 3044-3059, 2005.
- [10] Y. Hu e P. C. Loizou, "A new sound coding strategy for suppressing noise in cochlear implants", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 124, n. 1, pp. 498-509, 2008.
- [11] C. H. Taal, R. C. Hendriks e R. Heusdens, "Matching pursuit for channel selection in cochlear implants based on an intelligibility metric", *European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2012, pp. 504-508.
- [12] A. W. Voelkel, "Stimulation Channel Selection Methods", US7751900 B2, 2006.
- [13] C. V. Pavlovic, "Derivation of primary parameters and procedures for use in speech intelligibility predictions", *Journal of Acoustical Society of America*, v. 82, n. 2, pp. 413-422, 1987.
- [14] ANSI, *Methods for the Calculation of the Speech Intelligibility Index*, 1997.
- [15] I. Holube e B. Kollmeier, "Speech intelligibility prediction in hearing-impaired listeners based on a psychoacoustically motivated perception model", *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 100, n. 3, pp. 1703-1716, 1996.
- [16] C. H. Taal, *et al.*, "A short-time objective intelligibility measure for time-frequency weighted noisy speech", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2010, pp. 4214-4217.
- [17] C. H. Taal, *et al.*, "An algorithm for intelligibility prediction of time-frequency weighted noisy speech", *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, v. 19, n. 7, pp. 2125-2136, 2011.
- [18] F. Chen e P. C. Loizou, "Predicting the intelligibility of vocoded speech", *Ear and Hearing*, v. 32, n. 3, p. 331-338, 2011.
- [19] T. H. Falk *et al.*, "Objective quality and intelligibility prediction for users of assistive listening devices: advantages and limitations of existing tools", *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 32, n. 2, pp. 114-124, 2015.
- [20] M. J. Costa, M. C. M. Iorio e P. L. Mangabeira-Albernaz, "Reconhecimento de fala: desenvolvimento de uma lista de sentenças em português", *Acta AWHO*, v. 16, n. 4, pp. 164-73, 1997.
- [21] J. H. L. Hansen *et al.*, "CCI-MOBILE: Design and evaluation of a cochlear implant and hearing aid research platform for speech scientists and engineers", *IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI)*, 2019, pp. 1-4.
- [22] A. Alcaim, J. A. Solewicz e J. A. Moraes, "Frequência de ocorrência dos fonemas e listas de frases foneticamente balanceadas no português falado no Rio de Janeiro", *Journal of Communication and Information Systems*, v. 7, n. 1, pp. 23-41, 1992.
- [23] C. A. Ynoguti, "Reconhecimento de Fala Contínua Usando Modelos Ocultos de Markov", Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 1999.
- [24] G. A. Studebaker, "A 'rationalized' arcsine transform", *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, v. 28, n. 3, pp. 455-462, 1985.