

Revista Eletrônica
Paulista de Matemática

ISSN 2316-9664
v. 22, n. 3, dez. 2022

Eder Pereira Neves

Faculdade de Engenharia - Ilha Solteira

UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
ederpereira@uems.br

Ana Cláudia Vieira Cardoso

Faculdade de Filosofia e Ciências - Marília

UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
ana.cv.cardoso@unesp.br

Marco Aparecido Queiroz Duarte

Câmpus Cassilândia

UEMS - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
marco@uems.br

Jozue Vieira Filho

Faculdade de Engenharia - Ilha Solteira

UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
jozue.vieira@unesp.br

Sistema audiométrico baseado em regras fuzzy

Fuzzy rule based audiometric system

Resumo

Neste trabalho é apresentado um método capaz de auxiliar na interpretação das avaliações audiológicas. O modelo audiométrico fuzzy proposto permite reproduzir o audiograma utilizado em audiometria tonal limiar por meio de intervalos, diferenciando-o do convencional. As funções de pertinência foram elaboradas para atender as características do sistema e o conjunto de base de regra foi construído fundamentado na literatura especializada. A implementação computacional desenvolvida propôs estabelecer uma relação entre as entradas de níveis de pressão sonora determinadas por via aérea e via óssea com as saídas tendo como respostas o tipo, o grau e as configuração das perdas auditivas. O desempenho do modelo foi testado por meio de dados de audiogramas retirados da literatura especializada que descrevem o quadro clínico da audição. Os resultados mostraram-se análogos e satisfatórios perante ao diagnóstico prescrito.

Palavras-chave: Audiometria Tonal Limiar Fuzzy. Inferência Audiológica Fuzzy. Audiogramas Fuzzy.

Abstract

This paper presents a method capable of assisting in the interpretation of audiological evaluations. The proposed fuzzy audiometric model allows us to reproduce the audiogram used in tonal threshold audiometry by means of intervals, differentiating it from the conventional one. The pertinence functions was elaborated to meet the characteristics of the system and the set of rule bases were built based on the specialized literature. The computational implementation developed proposed establishing a relationship between the inputs of sound pressure levels determined by airway and bone pathway, with the outputs having as responses the type, degree and configuration of hearing loss. The performance of the model was tested by means of data from audiograms taken from the literature that describes the health state of hearing, and the results were analogous and satisfactory in relation to the prescribed diagnosis.

Keywords: Fuzzy Threshold Tonal Audiometry. Fuzzy Audiological Inference. Fuzzy Audiograms.



1 Introdução

A audição faz parte dos cinco sentidos humanos e a orelha é o órgão responsável por captar as ondas sonoras (ARAS, 2003). Para efeito de estudos a estrutura do aparelho auditivo ficou dividida em três partes: orelha externa, orelha média e orelha interna, componentes necessários para processar o som em diferentes frequências.

A audição inicia quando as ondas sonoras são captadas pelo pavilhão auricular e são transportadas até o tímpano (orelha média) utilizando o canal auditivo da orelha externa (PFAFF, 2017).

Na orelha média são encontrados os ossículos (martelo, bigorna e estribo) responsáveis por conduzir as vibrações do tímpano até a orelha interna. As ondas, neste processo, chegam sob a forma de energia mecânica amplificada (CONN, 2017). A função da orelha média é ajustar a pressão e o deslocamento da onda sonora sobre o meio aquoso que preenche a orelha interna (KEENER; SNEYD, 2009).

A orelha interna corresponde a cóclea, uma cavidade cônica, no formato de caracol, preenchida por um líquido denominado perilinfa (CONN, 2017). Nela, a transmissão sonora é feita por meio da vibração da membrana timpânica e da cadeia ossicular (por via aérea) ou pela vibração direta dos ossos do crânio (por via óssea) (PFAFF, 2017). A cóclea é dividida em duas câmaras longitudinais por meio da membrana basilar onde estão distribuídos os órgãos de Corti, que são sensores de vibração ligados a terminações nervosas. O sistema vestibular responsável pelo equilíbrio humano, transmite para o cérebro sinais elétricos que são codificações das informações sonoras geradas pela cóclea (DAVIES, 2016).

Segundo Conn (2017), a condutividade sonora acontece por dois meios: vias aéreas e ósseas. A condução por vias aéreas ocorre quando o som se propaga ao longo do canal auditivo, passando pela orelha média até chegar a orelha interna. Na condução por via óssea o som na faixa de baixa frequência, pode percorrer o canal auditivo rodeado pelo osso craniano, ignorar as orelhas externa e média e atingir diretamente o ouvido interno. A análise das vias aérea e óssea contribui para identificar o grau e o tipo da perda auditiva, causada geralmente por exposição a ruídos contínuos e intensos, doenças associadas e envelhecimento (DAVIES, 2016).

Segundo relatório da Organização Mundial da Saúde – OMS (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2021), cerca de 5% da população mundial, ou seja, 466 milhões de pessoas possuem deficiências auditivas incapacitantes. A maioria desses indivíduos vive em países de baixa ou média renda, sem acesso a orientação e exames adequados. No entanto, exames de rotina podem contribuir para prevenção e correção de danos na audição.

Pensando na necessidade de alertar e minimizar os efeitos da exposição dos altos níveis de pressão sonora na vida das pessoas, modelos estão sendo implementados para atender esta demanda. Alguns modelos matemáticos de destaque são os sistemas que utilizam inferência fuzzy baseado em regras semânticas para encontrar resposta a algum tipo de problema.

Com relação a esta temática, Li, Wang, Shang, Xu, Ali, Wang, Wu e Niu (2022) propõem um modelo fuzzy para avaliar quantitativamente o cansaço de trabalhadores de uma usina de carvão com relação a elevados períodos de exposição ao ruído. Os resultados apresentados são indicadores que ajudam nas avaliações do estado de fadiga, melhorias na segurança e na qualidade de vida dos mineiros expostos a altas taxas de ruído ocupacional principalmente naqueles que trabalham no período noturno.

Tripathy e Rao (2015) apresentaram um trabalho que busca avaliar a Perda Auditiva Induzida por Ruído (PAIR) em trabalhadores da maior mina de bauxita localizada em Odisha na Índia, usando um sistema baseado em regras fuzzy. Em tal pesquisa foram realizados exames audiométricos com

200 operários expostos a ruídos ≥ 85 dB, onde constataram que a PAIR atingiu diretamente a faixa etária 38-55 anos, intervalo este que o modelo fuzzy demonstrou uma sensibilidade ainda maior.

Zaheeruddin e Jain (2008) descreveram um sistema especializado em prever os efeitos da interferência da fala, devido a poluição sonora em seres humanos, usando uma abordagem baseada em regras fuzzy. Segundo os autores a interferência da fala medida em termos de inteligibilidade é considerada uma função do nível de ruído, levando em consideração a distância entre o orador e o ouvinte e a idade do ouvinte. As principais fontes utilizadas para o desenvolvimento deste modelo são os relatórios da OMS e levantamentos de campo realizados por vários pesquisadores. As implementações pela plataforma Fuzzy Logic Toolbox do MATLAB usando técnicas de inferência de Mamdani e Sugeno mostraram que os resultados encontrados estão em consonância com as orientações da OMS e da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA). O estudo revela que para uma boa comunicação as distâncias normais ("curta" e "média") encontradas em ambiente, o nível de ruído não deve exceder 65 dB para pessoas jovens de meia-idade, e 55 dB para idosas.

Em um outro trabalho Mallick, Kaleel e Siddiqui (2009) apresentam um modelo baseado em regras fuzzy para prever os efeitos da exposição a níveis elevados de pressão sonora gerados pelo aparador de grama tipo mochila usado na manutenção de rodovias na Malásia. O modelo descreve a eficiência do trabalho humano em função do nível de ruído, tempo de exposição e idade dos operadores conforme as leis do trabalho.

Os pesquisadores Bressane, Mochizuki, Caram e Roveda (2016) desenvolveram um sistema de inferência fuzzy (SIF) de apoio à avaliação de impactos da poluição sonora sobre a saúde pública aplicado na zona central da cidade brasileira de Rio Claro. Os dados foram obtidos por meio de medições sonoras e entrevistas com a população, gerando como indicadores o nível de ruído equivalente, o índice de ruído de tráfego e um diagnóstico participativo, por intermédio de um sistema fuzzy. Como resultado, o sistema proposto permitiu classificar os pontos avaliados quanto ao grau de impacto da poluição sonora sobre a saúde da população na área de estudo. A possibilidade de adequar o SIF de acordo com as condições de estudo viabiliza a sua generalização e, desta forma, apoia a avaliação e respectiva gestão do ruído ambiental em outras regiões.

Tendo em vista o efeito danoso na vida das pessoas, a deficiência auditiva pode ser classificada em relação ao tipo (local do comprometimento) e ao grau. A localização pode ser condutiva, neurossensorial ou mista. O grau pode ter suas classificações em contraste a intensidade sonora aplicada a cada estímulo.

O exame mais utilizado para identificação da perda e do grau auditivo é a Audiometria Tonal Limiar - ATL. As perdas auditivas são classificadas quanto ao tipo pela análise dos limiares de via aérea e de via óssea. A identificação das perdas auditivas quanto ao grau dependem dos intervalos associados à frequência e a intensidade de pressão sonora (EGGERMONT, 2017). Uma das vantagens da ATL é que ela é considerada um exame relativamente acessível, rápido, e menos invasivo (WALKER; CLEVELAND; DAVIS; SEALES, 2013). Por outro lado é considerado um teste subjetivo que depende das respostas do paciente aos estímulos apresentados pelo examinador, cujo resultado depende tanto da observação quanto da aplicação correta das técnicas de avaliação e registro para o correto diagnóstico (DAVIES, 2016).

O objetivo deste trabalho é desenvolver um Sistema Baseado em Regras Fuzzy - SBRF que possa auxiliar nos exames de ATL, conseqüentemente nas análises audiológicas. Para implementação deste modelo serão abordados aspectos fundamentais da audição humana, cuja aferição por via aérea e via óssea na relação entre intensidade da pressão sonora (dB) e frequência (Hz) fornecidas ao sistema geram informações relevantes para o diagnóstico auditivo.

Para exposição do modelo e discussão dos resultados o trabalho foi organizado da seguinte ma-

neira: Na Seção 2 são apresentados aspectos da psicoacústica associados a audiologia; a classificação de perda auditiva é descrita sucintamente na Seção 3; da mesma forma as técnicas utilizadas na ATL são especificadas na Seção 4; na Seção 5 são apresentados de maneira concisa os fundamentos dos SBRF; o modelo proposto é abordado na Seção 6 e os resultados e discussões são exibidos na Seção 7; por fim, na Seção 8, estão as considerações finais.

2 Psicoacústica e Audiologia

A percepção subjetiva dos sinais acústicos é estudada pela psicoacústica. Trata-se das definições de limiares de audibilidade, percepção da intensidade da frequência do som, mascaramento e os efeitos da audição binaural, localização das fontes, efeito estéreo, sendo apenas alguns dos diferentes campos de estudo desta área. A psicoacústica é um ramo da psicofísica e estuda o sistema de audição humana, e muitos de seus conceitos teóricos podem ser aplicadas a sistemas artificiais (BERITELLI; CASALE; RUGGERI, 2000).

O estudo da psicoacústica teve seu início nas ideias do matemático, médico, físico alemão Hermann L. F. Von Helmholtz (1821-1894), que afirmava que a música não é mera atribuição mecânica ou matemática oriundas de instrumentos que produzem os sons. Para ele a música não adivinha de uma força extra humana ou metafísica e que na verdade a música era um resultado de como o corpo humano percebia o som e de como o cérebro interpretava este som (GELFAND, 2010).

A audiologia é a ciência que estuda a audição, seu equilíbrio e distúrbios relacionados, e tem sua base científica na psicoacústica que, por sua vez, fundamenta as relações entre as sensações auditivas humanas e as propriedades físicas inerentes ao estímulo sonoro.

Os testes audiométricos subjetivos utilizados em audiologia, com o intuito de aferir a acuidade auditiva do indivíduo, só foram possíveis a partir das pesquisas psicoacústicas realizadas no final do século XIX por Helmholtz, Fechner e Weber e na década de 1930 por Fletcher e Munson, Stevens e Newman, Davis e Gloring, Sivian e White e Békèsy, cujos resultados são utilizados atualmente (FASTL; ZWICKER, 2007).

A audiologia se expandiu como campo de pesquisa permitindo o aprimoramento de técnicas empregadas na avaliação e reabilitação auditiva. A ATL é uma adaptação do método dos limites, com procedimentos expostos em um diagrama, no qual a apresentação dos estímulos acústicos é feita por um examinador, com auxílio de um audiômetro, cabendo ao indivíduo que está sendo avaliado, eventualmente, responder a apresentação de cada estímulo audível. Nos exames audiométricos, à medida que o examinador aumenta ou diminui a intensidade do audiômetro, as técnicas ascendentes e descendentes, que compõem o referido método psicofísico se equivalem, justificando a relação entre a psicoacústica e a audiologia (FASTL; ZWICKER, 2007; GELFAND, 2010). Os exames realizados na ATL identificam o tipo de perda auditiva, o grau, configurações audiométricas e lateralidade. A associação entre frequência e intensidade sonora provocam reações que caracterizam os limiares de audição dos pacientes expostos aos estímulos. Na próxima seção serão destacados estes efeitos.

3 Classificação de perda auditiva

Na classificação do tipo de perda auditiva são realizadas comparações dos limiares tonais entre via aérea e via óssea de cada orelha. As características que definem o tipo de perda auditiva estão

relacionadas aos locais afetados no aparelho auditivo. Tais perdas são chamadas de condutiva, sensorioneural e mista.

Quando acontece uma perda auditiva condutiva as ondas sonoras não atingem a cóclea perfeitamente devido a problemas encontrados na orelha externa (canal auditivo) ou na orelha média, especificamente no tímpano, ossículos, janela oval ou na tuba auditiva. E todos estes fatores determinam uma redução na capacidade da audição (CONN, 2017).

Uma perda auditiva sensorioneural acontece na orelha interna devido a degradação dos sensores nervosos impedindo que as vibrações sonoras sejam transmitidas ao cérebro (ZARENOE, 2012). As causas deste tipo de perda auditiva são diversas, sendo ela considerada pelos especialistas a mais comum podendo comprometer a acuidade auditiva em ambos ouvidos (CONN, 2017).

Quando ocorre uma perda auditiva mista tanto orelha externa e/ou média quanto a orelha interna são comprometidas. Assim, a combinação de fatores que provocam as perdas auditivas condutivas e neurosensoriais resultam em uma perda auditiva mista (ZARENOE, 2012). Normalmente um exame que detecta a perda, o grau e a configuração auditiva é o ATL, aspectos fundamentais serão discutidos na próxima seção.

4 Audiometria tonal limiar - ATL

A ATL é considerada um teste subjetivo porque depende da resposta do paciente aos estímulos auditivos apresentados pelo examinador que pode ser realizado por via aérea por meio de fones, e por via óssea com vibradores que estimulam a mastóide, sendo normalmente realizados em cabines com isolamento acústico (EGGERMONT, 2017). A ATL é essencial para o diagnóstico audiológico, pois determina os limiares auditivos comparando os valores obtidos com os padrões de normalidade, avaliando as respostas do paciente submetidos a tons puros, apresentados em diferentes frequências, assim descrevendo o tipo e grau da perda auditiva.

Um tom puro é caracterizado por uma onda sonora senoidal, resultado de um movimento harmônico simples, proveniente de uma relação que contém uma função seno constituída por uma única frequência (RABINER; SCHAFER, 2007). Para reproduzir tons puros, foi projetado um instrumento eletrônico denominado audiômetro.

Os níveis de pressão sonora diferem para cada frequência. A ATL afere, por sua vez, o valor em decibéis que o limiar do indivíduo está situado com relação a cada estímulo. Estes resultados são anotados em um gráfico que descreve os limiares de audibilidade, denominado de audiograma (EGGERMONT, 2017).

Embora a audição humana varie de 20 Hz a 20 kHz, há poucas informações de voz acima 8 kHz, e a percepção de frequências abaixo de 100 Hz é cada vez mais sensível por natureza, tornando-as difícil de avaliar. Além disso, a perda da sensibilidade auditiva é observada primeiro em alta frequência (8 kHz) e à medida que tal perda progride, seu efeito é observado também na região de frequência média (1-2 kHz) (WALKER; CLEVELAND; DAVIS; SEALES, 2013). Pelo fato da região de baixa frequência não fornecer informações sobre a perda auditiva, os audiologistas geralmente realizam os exames apenas na faixa de 250-8 kHz, muitas vezes em etapas de oitava. Portanto, no audiograma, as frequências variam de 250 Hz a 8 kHz em intensidades que vão desde -10 dB a 120 dB, dadas por uma escala logarítmica correspondendo ao nível de pressão sonora (NPS) ou nível de audição (NA). Em alguns casos específicos, quando o paciente responde à valores negativos de intensidade sua avaliação pode ser caracterizada como uma audição acima do normal (EGGERMONT, 2017; WALKER; CLEVELAND; DAVIS; SEALES, 2013).

A Tabela 1 fornece os valores de limiares de uma pessoa com audição normal para certos padrões de frequências começando ser aferidos com NPS em “0 dB”.

Os valores normais para os limiares auditivos foram definidos pela International Standards Organization (ISO) em 1984. Estes valores são resultados de grandes estudos populacionais realizados com adultos na faixa de 18 a 30 anos de idade.

Frequência (Hz):	250	500	1k	1,5k	2k	3k	4k	6k	8k
NPS (dB):	25,5	11,5	7	6,5	9	10	9	10,5	13

Tabela 1: Valores dos correspondentes limiares normais Hz × dB

Os audiogramas normalmente são construídos na forma de grade na qual as frequências, em Hertz (Hz), estão representadas logaritmicamente na abscissa, e o nível de audição (NA), em decibéis (dB), na ordenada. Na Figura 1 é ilustrado um audiograma com seus respectivos graus de perda auditiva fornecidos pela BIAP.

Quanto ao tipo de perda auditiva, algumas classificações são reconhecidas cientificamente pela American Speech Language Hearing Association (c1997-2022) e são levadas em consideração nos exames de ATL. O audiograma, depois de preenchido, apresenta uma das configurações e/ou morfologia da curva audiométrica destacada na Tabela 3. Esta classificação leva em consideração os limiares de vias aéreas.

		Denominação Média Tonal (dB)						Nível de Audição (dB)
-20	Normal ≤ 20 dB							
-10								
0								
10								
20								
30	Leve 21-40 dB							
40								
50								
60	Moderado 41-70 dB							
70								
80	Severo 71-80 dB							
90								
100	Profundo 81-110 dB							
110								
120								
		Total > 120 dB						
		125	250	500	1K	2K	4K	8K
		Baixa		Média		Alto		
		Frequência (Hz)						

Figura 1: Audiograma classificação de perda auditiva: Adaptado de BIAP

Como destacado, os exames de ATL tradicionais são constituídos de técnicas que unem simbologia e método para compor o laudo audiométrico do paciente. Nas seções seguintes será apresentado um modelo denominado Sistema Audiométrico Fuzzy - SAF utilizando os conceitos da ATL. Para isso, alguns conceitos de lógica fuzzy e implementação computacional serão abordados.

Tabela 2: Classificação de perda auditiva

Tipo de Perda Auditiva	Classificação
Perda Auditiva Condu-tiva	Limiares de via óssea menores ou iguais a 15 dB NA e limi-ares de via aérea maiores do que 25 dB NA, com diferença aéreo-ósseo maior ou igual a 15 dB.
Perda Auditiva Neuro-sensorial	Limiares de via óssea maiores do que 15 dB NA e limiares de via aérea maiores do que 25 dB NA, com diferença aéreo-ósseo de até 10 dB.
Perda Auditiva Mista	Limiares de via óssea maiores do que 15 dB NA e limiares de via aérea maiores do que 25 dB NA, com diferença aéreo-ósseo maior ou igual a 15 dB.

Fonte: Adaptada de Alshuaib, Al-Kandari e Hasan (2015)

Tabela 3: Configuração da perda auditiva

Tipo de Configuração de Perda Auditiva	Características
Ascendente	Melhora igual ou maior que 5 dB por oitava em direção às frequências altas.
Horizontal	Limiares alternando melhora ou piora de 5 dB por oitava em todas as frequências.
Descendente leve	Piora entre 5 a 10 dB por oitava em direção às frequências altas.
Descendente acentuada	Piora entre 15 a 20 dB por oitava em direção às frequências altas
Descendente em rampa	Curva horizontal ou descendente leve com piora ≥ 25 dB por oitava em direção às frequências altas
Em U	Limiares das frequências extremas melhores que as frequências médias com diferença ≥ 20 dB
Em U invertido	Limiares das frequências extremas piores que as frequências médias com diferença ≥ 20 dB.
Em entalhe (em V)	Curva horizontal com descendência acentuada em uma frequência isolada, com recuperação na frequência imediatamente subsequente.

Fonte: Adaptada de Alshuaib, Al-Kandari e Hasan (2015).

5 Sistema baseado em regras fuzzy - SBRF

Os SBRF têm sido utilizados com êxito nas áreas de automação, identificação de padrões, otimização de sistemas e muitas outras (SEISING, 2018). Seu potencial se deve a sua simplicidade, intuitividade e, principalmente, interrelação com a forma de raciocínio humano (ALCALÁ; CASILLAS; CORDÓN; HERRERA; ZWIR, 2000; PEIXOTO; BARROS; BASSANEZI; FERNANDES, 2016). Normalmente os conceitos relacionados à incerteza são incorporados a esses sistemas. Uma característica típica dos sistemas fuzzy é que eles são baseados no conceito de partição fuzzy das informações (BARROS; BASSANEZI; LODWICK, 2017; ROSS, 2017).

Os sistemas fuzzy são caracterizados por uma generalização dos sistemas clássicos (ZADEH, 2015). Produzindo uma espécie de relaxamento no conjunto imagem da função de pertinência representada por um conjunto foi que Zadeh (1965) formulou matematicamente o que se estabeleceu como sendo um subconjunto fuzzy (TRILLAS, 2011).

Um subconjunto fuzzy F do conjunto universo U é definido em termos de uma função de pertinência μ que a cada elemento $\mu(x)$, entre 0 e 1, chamado de grau de pertinência, associa uma variável de entrada x do domínio ao subconjunto fuzzy F . Dessa forma, F é sistematicamente representado por uma função $\mu_F : U \rightarrow [0, 1]$, onde $\mu_F(x) = 1$ representa pertinência plena e $\mu_F(x) = 0$ a não pertinência do elemento x a F . Ou seja, F é um conjunto de pares ordenados de um elemento genérico x e seu grau de pertinência, expresso como $F = \{(x, \mu_F(x)|x \in U\}$. Assim, sendo U um conjunto e $F \subset U$, a função de pertinência de F é dada por:

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in F \\ 0 & \text{se } x \notin F \end{cases} \text{ para todo } x \in U. \quad (1)$$

As funções de pertinência são normalmente representações gráficas que determinam a magnitude das entradas dos sistemas (ALCALÁ; CASILLAS; CORDÓN; HERRERA; ZWIR, 2000; ROSS, 2017). As regras utilizam as funções de pertinência como fator peso para determinar sua influência na saída dos conjuntos fuzzy. Uma vez combinadas e ponderadas, estas funções são desfuzzificadas constituindo uma saída real (crisp) que conduz o sistema (MESQUITA; DIMURO; SANTIAGO; LAUREANO, 2016). As funções de pertinência mais comuns são as triangulares, trapezoidais e gaussianas. Estas formas podem ser associadas com cada entrada e cada saída do sistema (CANAVESE; ORTEGA, 2011).

Os sistemas fuzzy utilizam soluções simples para resolver problemas de natureza complexa. Em vez de controlar e/ou modelar um processo através de relações complexas, um sistema fuzzy procura modelar o problema através de um conjunto simples de regras (BARROS; BASSANEZI; LODWICK, 2017).

Os principais tipos de SBRF são o de Mamdani e o de Takagi-Sugeno. A característica principal do sistema tipo Mamdani é que tanto a condição quanto a ação são expressas por termos linguísticos. Nos sistemas do tipo Takagi-Sugeno, apenas a condição é expressa por termos linguísticos e a ação, por funcionais (ROSS, 2017). O sistema Mamdani se destaca por ser mais intuitivo do que o Takagi-Sugeno, embora ambos sejam bastante utilizados em diversas pesquisas envolvendo SBRF (ALCALÁ; CASILLAS; CORDÓN; HERRERA; ZWIR, 2000).

Os SBRF, também denominados controladores fuzzy, possuem os seguintes componentes básicos: módulo de entrada (**fuzzificação**), módulo de processamento, constituído por base de regras linguísticas e um método de **inferência**, e módulo de saída (**defuzzificação**). Estes módulos são ilustrados na Figura 2.

Na fase de **fuzzificação**, o sistema converte as variáveis reais (crisp) em variáveis linguísticas fuzzy, ou seja, é um mapeamento dos conjuntos dos números reais para o conjunto fuzzy.

A fase de **inferência** consiste na manipulação da base de regras utilizando declarações "if-then" ($IF\langle\text{Condição}\rangle THEN\langle\text{Ação}\rangle$) e, ainda operações fuzzy tais como: união (operador *or*) $\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$, intersecção (operador *and*) $\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ e negação $\mu_{\bar{A}}(x) = (1 - \mu_A(x))$. A condição **IF** constitui uma região fuzzy no espaço das variáveis de entrada, enquanto que a ação **THEN** descreve uma conclusão, cuja inferência conduz a algum resultado (PROKOPOWICZ; CZERNIAK; MIKOLAJ; MIKOLAJEWSK; APIECIONEK; SLEZAK, 2017).

É na definição da base de regras que as informações do fenômeno em estudo são utilizadas. Para cada estado definido pelos termos linguísticos da variável de entrada é definida uma regra

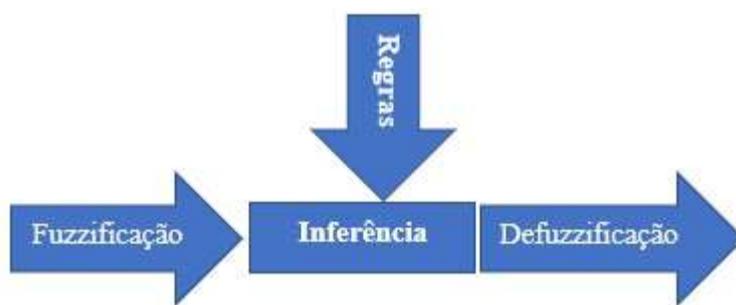


Figura 2: Controlador Fuzzy/ SBRF.

(NEVES; DUARTE; VILLARREAL, 2019). Sendo assim, quanto mais termos linguísticos, mais informações são incorporadas na modelagem (ROSS, 2017). Normalmente, em um sistema fuzzy existem várias regras para descrever a ação necessária, ou seja, um conjunto de regras. As regras do sistema de inferência fuzzy representam as relações entre suas entradas e suas saídas, formando a base de conhecimento (NEVES; DUARTE; VILLARREAL, 2019). Portanto, a base de regras é um conjunto formado por regras fuzzy que relacionam os termos linguísticos das variáveis de entrada e saída do sistema, (ALCALÁ; CASILLAS; CORDÓN; HERRERA; ZWIR, 2000; MESQUITA; DIMURO; SANTIAGO; LAUREANO, 2016). Pode-se destacar que cada regra da base satisfaz a seguinte estrutura:

$$\underbrace{\text{IF } a_1 \text{ está } A_{i,1} \text{ e } \dots \text{ e } a_n \text{ está } A_{i,n}}_{\text{condição}} \underbrace{\text{ THEN } b_1 = B_1(a_1, \dots, a_n)}_{\text{conclusão}} \quad (2)$$

da mesma forma

$$\text{IF } a \text{ está } A_i \text{ THEN } b \text{ está } B_i,$$

sendo A_i e B_i os conjuntos fuzzy que representam termos linguísticos das variáveis de entrada e saída, respectivamente.

O termo a , que representa a entrada do sistema, está em A_i , e significa que $\mu_{A_i}(a) \in [0, 1]$. Entretanto, A_i e B_i podem ser escritos como produtos cartesianos de conjuntos fuzzy, $A_i = A_{i1} \times A_{i2} \times A_{i3} \times \dots \times A_{im}$ e $B_i = B_{i1} \times B_{i2} \times B_{i3} \times \dots \times B_{in}$. Assim, cada par de conjuntos fuzzy (A_{ij}, B_{ik}) representa um termo linguístico para a j -ésima variável de entrada e a k -ésima variável de saída. Portanto, dizer, que a está em A_i significa que

$$\mu_{A_i}(a) = \min\{\mu_{A_{i1}}, \mu_{A_{i2}}, \dots, \mu_{A_{im}}\} \in [0, 1].$$

A relação existente entre variáveis linguísticas é caracterizada pelo operador mínimo (\min), isto é, cada regra é considerada uma relação fuzzy R_i , onde o grau de pertinência para cada par (a, b) é obtido:

$$\mu_{R_i}(a, b) = \min\{\mu_{A_i}(a), \mu_{B_i}(b)\}.$$

A relação estabelecida entre cada regra é caracterizada pelo operador máximo (\max), ou seja, uma relação fuzzy R que representa o modelo determinado por uma base de regras, obtida pela união (máximo) de cada regra individual, de modo que para cada par (a, b) obtém-se:

$$\mu_R(a, b) = \max_{1 \leq i \leq n} \{\mu_{A_i}(a) \wedge \mu_{B_i}(b)\},$$

sendo \wedge o operador *min*. O sistema mostrado na Figura 3 descreve uma ação correspondente. Para cada conjunto A de dados de entrada, obtém-se um conjunto B de dados de saída. Assim, pelo método de Mamdani, a função de pertinência de B é representada por

$$\mu_B(b) = \max_{1 \leq i \leq n} \{ \max_a \{ \mu_A(a) \wedge \mu_{A_i}(a) \} \wedge \mu_{B_i}(b) \},$$

sendo a um conjunto clássico unitário, com $\mu_A(a) = 1$ e $\mu_A(a) \leq 1$, obtendo:

$$\mu_B(b) = \max_{1 \leq i \leq n} \{ \mu_{A_i}(a) \wedge \mu_{B_i}(b) \}.$$

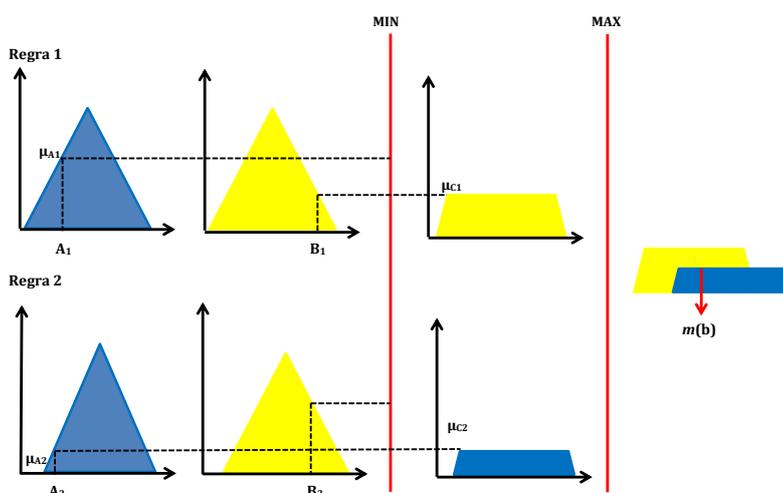


Figura 3: Método de inferência de Mamdani (*max – min*) com duas variáveis de entrada e uma de saída.

O módulo de **defuzzificação** converte cada conclusão obtida pelo método de inferência em um número real que melhor representa a tomada de decisão. O valor de saída é calculado pelo somatório do produto entre o conjunto de entrada e seu respectivo grau de pertinência. Este resultado é dividido pelo somatório das pertinências para cada entrada, resultando na ação de controle (PROKOPOWICZ; CZERNIAK; MIKOLAJEWSKI; APIECIONEK; SLEZAK, 2017). Um dos principais métodos de defuzzificação é o centróide, ou centro de massa, que para um conjunto no domínio discreto e no domínio contínuo as respectivas expressões são

$$m(B) = \frac{\sum_{i=1}^n b \cdot \mu_B(b)}{\sum_{i=1}^n \mu_B(b)} \quad \text{e} \quad m(B) = \frac{\int_{\mathbb{R}} b \cdot \mu_B(b) db}{\int_{\mathbb{R}} \mu_B(b) db}. \quad (3)$$

Independente do caso discreto ou contínuo, o valor $m(B)$, calculado pela Equação (3), corresponde à projeção do centro de inércia da figura definida pelo conjunto de regras sobre o eixo da variável de controle (ROSS, 2017). Neste caso, o controlador fuzzy pode ser definido como sendo uma função $F : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$.

6 Sistema audiométrico baseado em regras fuzzy

Para a implementação do SBRF para avaliação do grau e tipo de perda auditiva foram escolhidas as variáveis seguindo o guia de orientações audiológicas emitido pela BIAP. As variáveis de entrada escolhidas para o SBRF foram os níveis de pressão sonora das vias aérea e óssea com seus termos linguísticos destacados na Tabela 4. O modelo é constituído por duas variáveis de saída. A

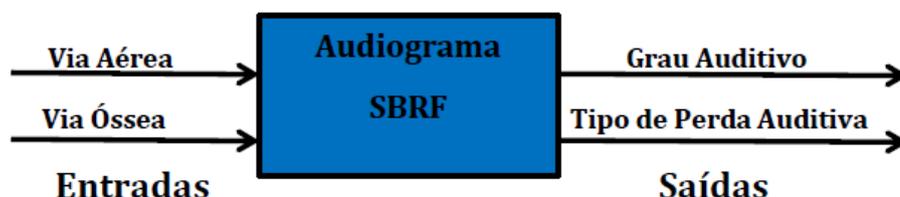


Figura 4: Esquema do modelo SBRF proposto.

primeira que determina os grau de perda auditiva com os seguintes termos linguísticos: normal, leve, moderado, severo, profundo e total e o segundo o GAP que identifica o tipo de perda auditiva, condutiva, neurossensorial e mista. Os respectivos dados estão representados nas tabelas 5 e 6. O modelo foi sintetizado na Figura 4.

Para Ross (2017), uma função de pertinência deve refletir o conhecimento que se tem em relação a intensidade com que um objeto pertence a um conjunto fuzzy. No entanto, para implementação do sistema proposto foram utilizadas as funções de pertinência triangulares e na forma de rampa, pois, nos testes realizados as mesmas apresentaram resultados satisfatórios e passíveis de ajustes para cada NPS.

As variáveis de entrada e saída representadas nas tabelas 4, 5 e 6 possuem suas respectivas funções de pertinência tipo triangular, rampa direita e rampa esquerda, dadas por:

$$\text{Trimf}(x; a; b; c) = \max \left\{ \min \left\{ \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right\}, 0 \right\}, \text{RampD}(x; a; b) = \max \left\{ \min \left\{ \frac{x-a}{b-a} \right\}, 0 \right\} \text{ e}$$

$$\text{RampE}(x; b; c) = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{c-x}{c-b} \right\} \right\}.$$

Tabela 4: Definição da função de pertinência da variável de entrada **via aérea** e **via óssea**.

Variável Linguística	Função de Pertinência	Delimitadores
Pequeno Baixo	Rampa Direita	[0; 25]
Pequeno Médio	Triangular	[20;30; 50]
Médio	Triangular	[40; 60; 80]
Alto Pequeno	Triangular	[65; 85; 100]
Alto	Triangular	[90; 105; 115]
Alto Grande	Rampa Esquerda	[110; 120]

6.1 A base de regras do sistema

A base de regras de um sistema fuzzy estabelece uma relação entre as variáveis independentes (BARROS; BASSANEZI; LODWICK, 2017). As informações audiológicas permitiram propor regras que se relacionam com as variáveis de estado. Assim, foram elaboradas 16 regras para descrever o grau de perda auditiva e 16 para o tipo de perda auditiva, como destacado na Tabela 7.

Os critérios estabelecidos para composição das 32 combinações e os seus respectivos termos linguísticos foram com base na literatura que motivou este estudo.

Tabela 5: Definição da função de pertinência da variável de saída **Grau Auditivo**.

Variável Linguística	Função de Pertinência	Delimitadores
Normal	Triangular	[0; 0.1; 0.15]
Leve	Triangular	[0.15; 0.25; 0.4]
Moderado	Triangular	[0.4; 0.5; 0.6]
Severo	Triangular	[0.6; 0.7; 0.8]
Profundo	Triangular	[80; 90; 1.0]
Total	Triangular	[1.0; 1.1; 1.2]

Tabela 6: Definição da função de pertinência da variável de saída **Tipo de Perda Auditiva**.

Variável Linguística	Função de Pertinência	Delimitadores
Normal	Rampa Esquerda	[0; 0,1;]
Perda Auditiva Condutiva	Triangular	[0,1; 0,25; 0,45]
Perda Auditiva Mista	Triangular	[0,45; 0,6; 0,7]
Perda Auditiva Neurosensorial	Rampa Direita	[0,7; 1,0]

Tabela 7: Composição da base de regras no sistema de inferência fuzzy.

Variáveis de Entrada		Variáveis de Saída	
Via Aérea	Via Óssea	Grau de Perda Auditiva	Tipo de Perda Auditiva
Pequeno Baixo	Pequeno Baixo	Normal	Normal
Pequeno Médio	Pequeno Baixo	Leve	Condutiva
	Pequeno Médio	Leve	Neurosensorial
Médio	Pequeno Baixo	Moderado	Condutiva
	Pequeno Médio	Moderado	Mista
	Médio	Moderado	Neurosensorial
Alto Pequeno	Pequeno Baixo	Severo	Condutiva
	Pequeno Médio	Severo	Mista
	Médio	Severo	Mista
	Alto Pequeno	Severo	Neurosensorial
Alto	Pequeno Baixo	Profundo	Condutiva
	Pequeno Médio	Profundo	Mista
	Médio	Profundo	Mista
	Alto Pequeno	Profundo	Mista
	NAIPS	Profundo	Cofose
Alto Grande	NAIPS	Total	Cofose

Legenda: NAIPS- Não aplica a esta intensidade de pressão sonora .

O método de inferência de Mamdani foi utilizado para o cálculo do valor numérico de saída de acordo com as bases de regras. Considerado as intensidades de pressão dadas por via área e via óssea o grau auditivo, descrito pelo modelo, pode ser aferido considerando os passos a seguir.

1º Passo: Calculando a ativação de cada regra:

$$R_i = \mu_{A_{1i}} \wedge \mu_{A_{2i}} \wedge \mu_{A_{3i}}, \quad \forall_i = 1, \dots, 16.$$

Desta forma as ativações das três primeiras regras ficam:

R_1 . Se (Via Aérea é Pequeno Baixo) e (Via Óssea é Pequeno Baixo) então (Grau Auditivo Normal) e (Tipo Normal).

R_2 . Se (Via Aérea é Pequeno Médio) e (Via Óssea é Pequeno Baixo) então (Grau Auditivo Leve) e (Perda Auditiva Condutiva).

R_3 . Se (Via Aérea é Pequeno Médio) e (Via Óssea é Pequeno Médio) então (Grau Auditivo Moderado) e (Perda Auditiva Neurosensorial).

Se o sistema estivesse considerando somente a ativação destas três regras, as outras seriam nulas, ou seja, $R_i = 0$ para $i = 4, \dots, 16$.

2º Passo: O conjunto fuzzy Grau Auditivo é determinado através da união dos conjuntos fuzzy obtidos tomando o mínimo entre R_i e a função de pertinência da consequente da regra, ou seja,

$$\mu_{\text{Grau}} = \bigcup_{i=1}^{16} (R_i \wedge \mu_{Q_i}), \quad (4)$$

onde $Q_i \in \{ \text{Normal, Leve, Moderado, Severo, Profundo, Total} \}$.

Utilizando o mesmo procedimento e uma base de regras específica determinam-se as classificações do tipo de perda auditiva.

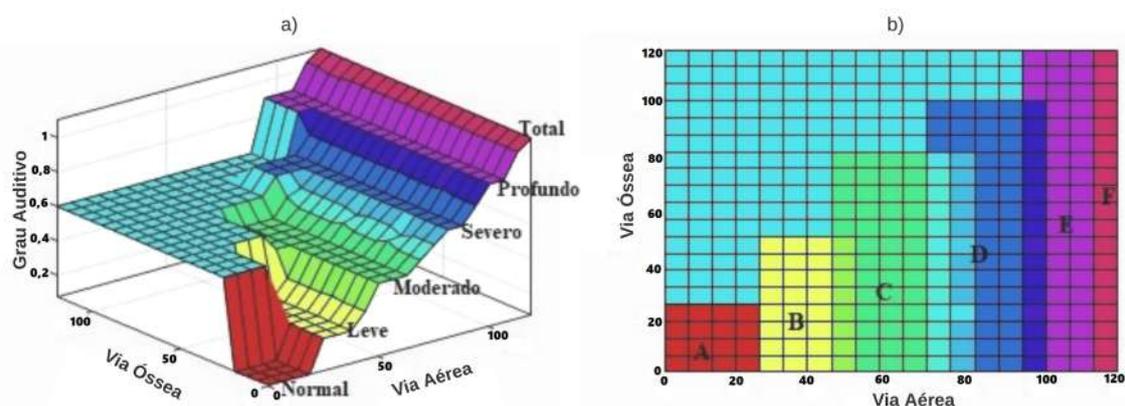


Figura 5: a) Superfície: (Via Aérea, Via Óssea, Grau Autivo) e b) Mapa de Contorno (Via Aérea, Via Óssea)

7 Resultados e discussões

Utilizando a ferramenta Fuzzy Logic Toolbox do MATLAB®, e o software InFuzzy, foi possível implementar computacionalmente o sistema audiométrico, gerando superfícies e gráficos da representação do caso em estudo.

Inseridas as 32 regras que formam a base de conhecimento do sistema, utilizando o método de inferência de Mamdani e o método de defuzzificação centro de gravidade (Centroide), obteve-se as superfícies, figuras 5.a e 6.a, como respostas do sistema fuzzy, com os respectivos mapas de contorno, grau e o tipo de perda auditiva, representadas pelas figuras 5.b e 6.b.

Na Figura 5.b as regiões A; B; C; D; E e F definem a performance do modelo SAF determinando respectivamente as classificações do grau auditivo (normal, leve, moderado, severo, profundo ou total) para cada intervalo destacado. Na Figura 6.b o sistema descreve os tipos de perdas auditivas

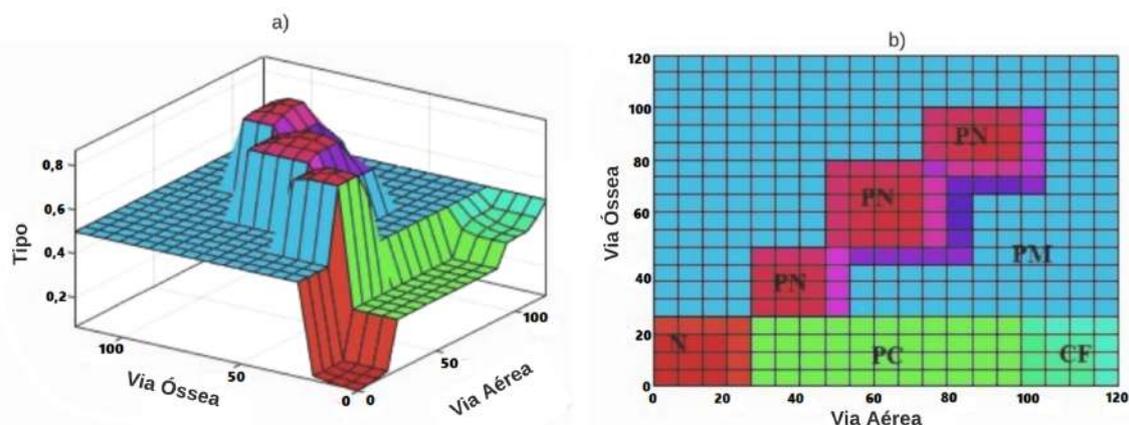
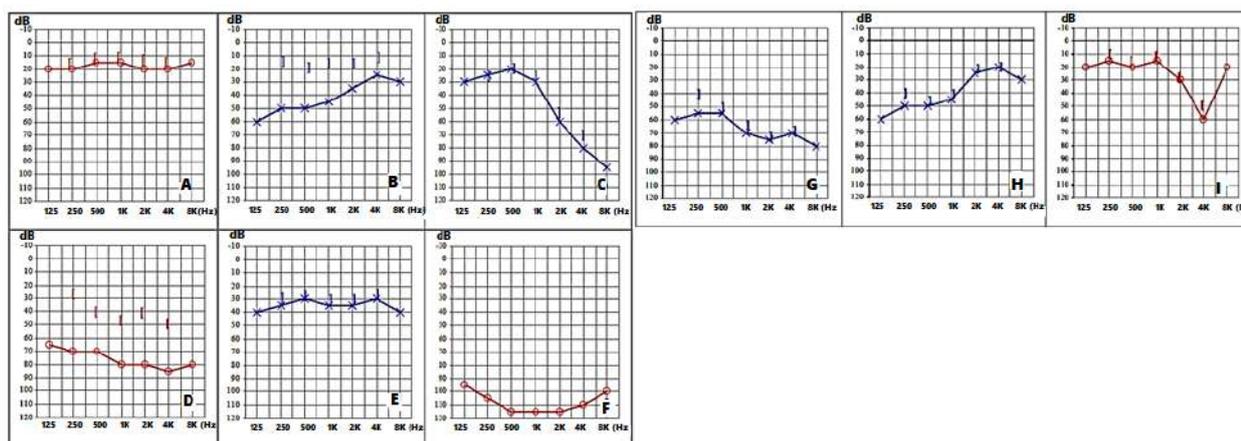


Figura 6: a) Superfície: (Via Aérea, Via Óssea, Tipo de Perda Auditiva) e b) Mapa de Contorno (Via Aérea e Via Óssea para o tipo de perda auditiva)



Simbologia: condução aérea do ouvido direito (O); condução aérea do ouvido esquerdo (X); condução óssea do ouvido direito (I); condução óssea do ouvido esquerdo (J).

Figura 7: Exemplos de audiogramas Costa (2008).

representadas pelas áreas N; PN; PC; PM e CF, definindo as condições normal, perda auditiva neurosensorial, perda auditiva condutiva, perda auditiva mista e cofose.

Tomando como referência o trabalho de Costa (2008) para mostrar a eficiência do SAF desenvolvido são apresentados na Figura 7 nove audiogramas, ou seja, resultados de nove orelhas, avaliadas para diferentes valores de intensidades sonoras dadas por vias aérea e óssea. Realizando uma análise com as funções características da saída e com seus respectivos graus de pertinência definidos nas tabelas 5 e 6 foi possível caracterizar cada aferição dentro do conjunto fuzzy, grau auditivo e tipo de perda auditiva, justificando uma tomada de decisão.

Os resultados do SAF estão representados na Tabela 8. Nela cada aferição seguiu a ordem de cada frequência de estímulo dadas pelos audiogramas da Figura 7 fornecidos por Costa (2008). Lembrando que nos testes de ATL as frequências 125 Hz e 8 kHz e as intensidades de pressão

Tabela 8: Resultados do audiograma fuzzy.

A				B				C			
○	[	GA	GAP	x	]	GA	GAP	x	]	GA	GAP
20	0,0	0,10	0,0	60	0,0	0,50	2,8	30	0,0	0,26	0,28
20	15	0,10	0,0	50	15	0,50	0,29	25	25	0,25	0,91
15	15	0,10	0,0	50	20	0,50	0,30	20	20	0,10	0,0
15	15	0,10	0,0	45	15	0,33	0,30	30	25	0,25	0,91
15	20	0,10	0,0	35	15	0,25	0,29	60	55	0,50	0,92
15	20	0,10	0,0	25	10	0,25	0,28	70	80	0,70	0,72
0,0	15	0,10	0,0	30	0,0	0,26	0,28	95	0,0	0,80	0,29
D				E				F			
○	[	GA	GAP	x	]	GA	GAP	○	[	GA	GAP
65	0,0	0,50	0,28	40	0,0	0,25	0,28	95	0,0	0,26	0,29
70	25	0,57	0,56	35	30	0,26	0,92	105	0,0	0,0	0,28
70	40	0,57	0,56	30	30	0,26	0,93	115	0,0	0,0	0,28
80	45	0,70	0,55	35	30	0,26	0,92	115	0,0	0,0	0,28
80	40	0,70	0,56	35	30	0,26	0,92	115	0,0	0,0	0,28
85	50	0,70	0,56	30	30	0,26	0,93	110	0,0	0,0	0,28
80	0,0	0,70	0,28	40	0,0	0,25	0,28	100	0,0	0,0	0,27
G				H				I			
x	]	GA	GAP	x	]	GA	GAP	○	[	GA	GAP
60	0,0	0,50	0,28	60	0,0	0,50	0,28	20	0,0	0,10	0,0
55	40	0,50	0,56	50	40	0,50	0,56	15	0,10	0,10	0,0
55	50	0,50	0,91	50	45	0,50	0,76	20	15	0,10	0,0
70	65	0,57	0,81	45	40	0,33	0,76	15	15	0,10	0,0
75	75	0,63	0,81	35	35	0,26	0,92	30	30	0,26	0,97
70	70	0,57	0,81	20	20	0,10	0,0	60	50	0,50	0,95
80	0	0,70	0,28	30	0,0	0,26	0,28	20	0,0	0,10	0,0

Legenda: condução aérea do ouvido direito (○) em dB; condução aérea do ouvido esquerdo (x) em dB; condução óssea do ouvido direito ([) em dB; condução óssea do ouvido esquerdo (]) em dB; GA - Grau Auditivo e GAP - Tipo de perda Auditiva.

sonora acima de 90 dB não são utilizadas pelo vibrador de via óssea. Nas análises audiológicas existe uma orientação para definir a perda tonal média. Ela é atribuída pela média dos valores, obtidos em dB, nas frequências de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz e 4 kHz. Toda frequência não percebida é referenciada como 120 dB de perda. Para casos de perda auditiva assimétrica, ou seja em único ouvido, é recomendado pelos especialistas calcular o nível médio de perda em dB e multiplicá-lo por 7 em relação ao melhor ouvido, e por 3 para o pior ouvido. O resultado final é somado e dividido por 10 para assim emitir o laudo do paciente (DAVIES, 2016).

A tomada de decisão tanto para grau auditivo como para tipo de perda auditiva está associada ao comportamento descrito no modelo fuzzy proposto, cujos intervalos estão definidos nas tabelas 5 e 6. Com relação ao audiograma de referência a Figura 7.A apresenta uma avaliação de audição normal, verificado também no SAF ilustrado na Tabela 8 A.

Ainda na Figura 7 ilustram-se os seguintes quadros clínicos: **B** perda auditiva de condução, **C** perda auditiva neurosensorial, **D** perda auditiva mista, **E** deficiência auditiva leve, **F** deficiência

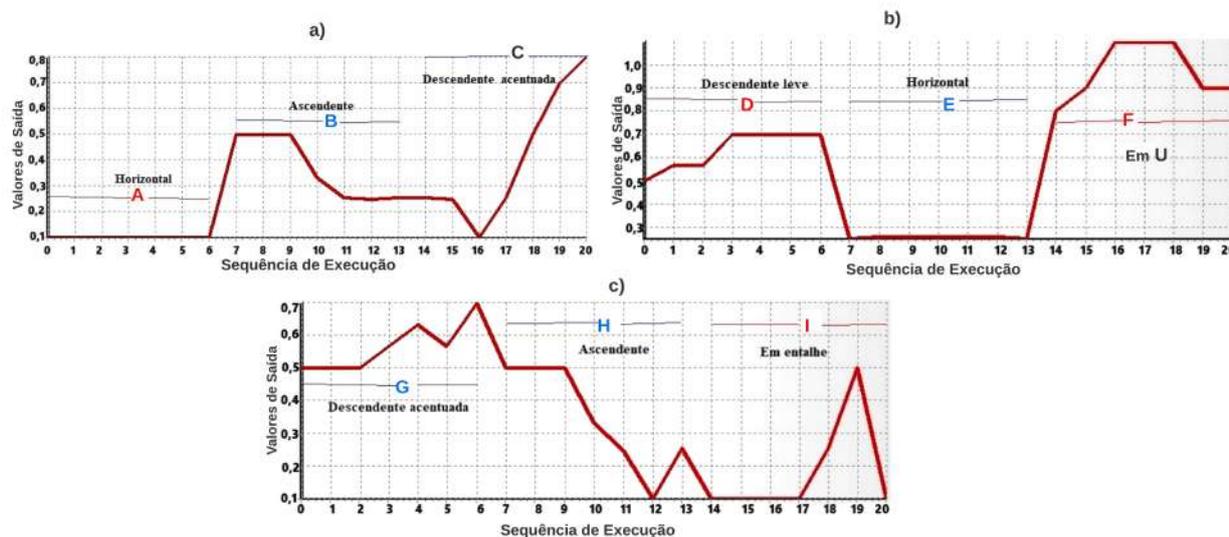


Figura 8: Histórico de saídas a), b) e c) do SAF representando o tipo de configuração auditiva.

auditiva profunda, **G** perda neurossensorial – otosclerose coclear, **H** perda neurossensorial - doença de Ménière. As tabelas 8 **C, D, E, F, G, H e I** geradas pelo SAF estão em consonância com as avaliações dadas por Costa (2008) tomando como referência a resposta do sistema descrito nas tabelas 5 e 6.

A Figura 7.A apresenta o tipo de configuração auditiva fornecido pelo modelo SAF aplicado. Cada intervalo destacado representa a classificação da morfologia da curva audiométrica tomando como referência os critérios de avaliação audiológica da Tabela 3. Obedecendo a sequência de execução do sistema, nas figuras 8.a, b e c foram destacados 9 intervalos **A, B, C, D, E, F, G, H e I** especificando a configuração audiológica de cada audiograma da Figura 7.

8 Conclusão

O SAF apresentado neste trabalho teve como objetivo fornecer numericamente as classificações dos exames de ATL. Cabe ressaltar que a avaliação ATL, além de ajudar no diagnóstico de pacientes que se queixam de problemas ligados a audição, também faz parte do conjunto de exames de aptidão ao trabalho. O método proposto é capaz de ajudar a interpretar e analisar as condições da saúde auditiva humana tendo como entrada os níveis de pressão sonora e as frequências apresentadas aos pacientes submetidos ao exame de ATL, descrevendo como saídas do sistema as avaliações audiométricas para casos de normalidade ou grau, tipo e a configuração de perda auditiva.

O desempenho do modelo foi verificado por meio de dados retirados de audiogramas da literatura especializadas que descrevem o quadro clínico da audição. Os resultados apresentados pelo SAF mostraram-se análogos e satisfatórios perante o diagnóstico prescrito. As simulações realizadas com casos normais e perda da acuidade auditiva justificam a eficiência do modelo em relação aos audiogramas tradicionais.

O SAF desenvolvido pode ser uma tendência frente aos sistemas de inferência fuzzy atuais, que formulam sua base de regras por meio de dados retirados da literatura especializada.

As perspectivas futuras são de aprimorar este modelo para descrever casos em que ocorrem



mascaramentos auditivos, perdas auditivas assimétricas e a logaudiometria técnica que avalia a habilidade do indivíduo para detectar e reconhecer a fala.

9 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

10 Bibliografia

- ALCALÁ, R.; CASILLAS, J.; CORDÓN, O.; HERRERA, F.; ZWIR, S. J. I. Learning and tuning fuzzy rule-based systems for linguistic modeling. *In: LEONDES, C. T. (ed.). Knowledge-Based Systems*. San Diego: Academic Press, 2000. v. 3, p. 889-941.
- ALSHUAIB, W. B.; AL-KANDARI, M. J.; HASAN, S. M. Classification of hearing loss. *In: BAHMAD JR, F. (ed.). Update on hearing loss*. London: IntechOpen, 2015. p. 29-37.
- AMERICAN SPEECH-LANGUAGE-HEARING ASSOCIATION. **Configuration of hearing loss**. [Rockville]: American Speech-Language-Hearing, Association, c1997-2022. Disponível em: <http://www.asha.org/public/hearing/configuration-of-Hearing-Loss> . Acesso em: 24 ago. 2022.
- ARAS, V. P. Audiometry techniques, circuits, and systems. *In: IIT BOMBAY M. TECH. CREDIT SEMINAR, 2003, Mumbai. Report [...]*. Mumbai: Electronic Systems Group, EE Dept. Disponível em: https://www.ee.iitb.ac.in/~esgroup/es_mtech03_sem/sem03_paper_03307411.pdf. Acesso em: 20 ago. 2022.
- BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C.; LODWICK, W. A. **A first course in fuzzy logic, fuzzy dynamical systems, and biomathematics: theory and applications**. Berlin: Springer, 2017.
- BERITELLI, F.; CASALE, S.; RUGGERI, G. A psychoacoustic auditory model to evaluate the performance of a voice activity detector. **Signal Processing**, v. 80, n.7, p.1393–1397, 2000.
- BRESSANE, A.; MOCHIZUKI, P. S.; CARAM, R. M.; ROVEDA, J. A. F. A system for evaluating the impact of noise pollution on the population's health. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 32, n. 5, e00021215, p. 1-11, 2016.
- Bureau International d'Audiophonologie - BIAP**. Disponível em: <http://www.biap.org/en/recommendations>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- CANAVESE, D.; ORTEGA, N. A proposal of using fuzzy system to integrate scores of Health and Environment: a case study at Brazil. *In: CONFERENCE OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR FUZZY LOGIC AND TECHNOLOGY, 7., 2011, Paris. Proceedings [...]*. Paris: EUSFLAT, 2011. Disponível em: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/eusflat-11/2260>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- CONN, P. M. (ed). **Conn's translational neuroscience**. London: Elsevier, 2017.



- COSTA, M. F. G. **Estudo biomecânico do ouvido médio**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência de Engenharia)-Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.
- DAVIES, R. A. Audiometry and other hearingtests. **Handbook of clinical neurology**, v. 137, p. 157-176, 2016.
- EGGERMONT, J. J. **Hearing loss**. London: Academic Press, 2017.
- FASTL, H.; ZWICKER, E. **Psychoacoustics: facts and models**. New York: Springer, 2007.
- GELFAND, S. A. **Hearing: an introduction to psychological and physiological accoustics**. 5th ed. London: Informa Helthcare, 2010.
- KEENER, J.; SNEYD, J. **Mathematical physiology**. 2nd ed. New York: Springer, 2009.
- LI, B.; WANG, E.; SHANG, Z.; XU, G.; ALI, M.; WANG, H.; WU, Q.; NIU, Y. Quantification study of working fatigue state affected by coal mine noise exposure based on fuzzy comprehensive evaluation. **Safety Science**, v. 146, article 105577, p. 1-13, 2022.
- MALLICK, Z.; KALEEL, A. H.; SIDDIQUI, A. N. An expert system for predicting the effects of noise pollution on grass trimming task using fuzzy modeling. **International Journal of Applied Environmental Sciences**, v. 4, n. 4, p. 389–403, 2009.
- MESQUITA, M. E. R. V.; DIMURO, G. P.; SANTIAGO, R. H. R.; LAUREANO, E. E. (ed). **Recentes avanços em sistemas fuzzy**. Campinas: SBMAC, 2016.
- NEVES, E. P.; DUARTE, M. A. Q.; ALVARADO, F. V. Sistema baseado em regras fuzzy para avaliação da qualidade da água. **C.Q.D.– Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, v. 14, p. 95-109, 2019. Edição Ermac. Disponível em: <https://www.fc.unesp.br/Home/Departamentos/Matematica/revistacqd2228/v14a09-sistema-baseado-em-regras-fuzzy.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2022.
- PEIXOTO, M. S.; BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C.; FERNANDES, O. A. On fuzzy control of soybean aphid. **Applied Mathematics**, v. 7, n. 17, p. 2149–2164, 2016.
- PFAFF, D. W.; VOLKOW, N. D. (ed). **Neuroscience in the 21st century**. New York: Springer, 2017.
- POSSELT, E. L. **Infuzzy: ferramenta para desenvolvimento de aplicações de sistemas difusos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Processos Industriais) – Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2011. Disponível em: <http://www.unisc.br/ppgspi>. Acesso em: 19 ago. 2022.
- PROKOPOWICZ, P.; CZERNIAK, J.; MIKOLAJEWSKI, D.; APIECIONEK, L.; SLEZAK, D. (ed.). **Theory and applications of ordered fuzzy numbers**. Cham: Springer, 2017.
- RABINER, L. R.; SCHAFER, R. W. **Introduction to digital speech processing**. Boston: Now, 2007.



ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

SEISING, R. Lotfi Aliasker Zadeh (1921-2017) - his life and work from the perspective of a historian of science. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 331, p. 3-11, 2018.

TRILLAS, E. Lotfi A. Zadeh: on the man and his work. **Scientia Iranica**, v. 18, n. 3, p. 574–579, 2011.

TRIPATHY, D. P.; RAO, D. S. Assessment of noise induced hearing loss (NIHL) of mine workers in a bauxite mine using fuzzy logic. *In*: INTER-NOISE CONGRESS & EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 44., 2015, San Francisco, USA. **Proceedings...** San Francisco, USA: Internoise, 2015.

WALKER, J. J.; CLEVELAND, L. M.; DAVIS, J. L.; SEALES, J. S. Audiometry screening and interpretation. **American Family Physician**, v. 87, n. 1, p. 41-47, 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Global Report. **World report on hearing**. Geneva: WHO, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-hearing>. Acesso em: 22 ago. 2022.

ZADEH, L. A. Fuzzy logic—a personal perspective. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 281, p. 4–20, 2015.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZAHEERUDDIN; JAIN, V. K. An expert system for predicting the effects of speech interference due to noi-se pollution on humans using fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, v. 35, n. 4, p. 1978–1988, 2008.

ZARENNOE, R. **Tinnitus in patients with sensorineural hearing loss: management and quality of life**. Linköping: Linköping University, 2012.