



Análise de Quantificação de Recorrência e Análise Discriminante Aplicadas à Classificação de Sinais de Vozes Saudáveis e Sinais de Vozes Patológicas

Vinícius Jefferson Dias Vieira¹, Silvana Cunha Costa², Washington César de Almeida Costa³

¹Graduando do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações – IFPB. Bolsista do CNPq. e-mail: viniciusjdv@gmail.com

²Professora da Coordenação de Engenharia Elétrica - IFPB. e-mail: silvana@ifpb.edu.br

³Professor da Coordenação de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias - IFPB. e-mail: washington@ifpb.edu.br

Resumo: Este trabalho trata da análise acústica de sinais de vozes saudáveis e de vozes afetadas por paralisia nas pregas vocais, utilizando a técnica de quantificação de recorrência. É investigado o melhor valor para o parâmetro que define os pontos recorrentes dentro do gráfico de recorrência, denominado raio de vizinhança, no qual se obtenha as melhores taxas de classificação. As medidas de quantificação de recorrência empregadas são: Taxa de Recorrência, Determinismo, Comprimento máximo das linhas diagonais, Entropia de Shannon, Tendência, Laminaridade, Tempo de permanência em um estado e Comprimento máximo das linhas verticais. É avaliado o desempenho das medidas de forma individual e combinada. As combinações são realizadas, considerando o valor de raio de vizinhança que obtém melhor acurácia individual para cada medida. A classificação é realizada por meio da análise discriminante, com as funções linear e quadrática. O melhor resultado obtido por meio de validação cruzada indica uma acurácia de $98,18 \pm 3,83$ com a combinação de apenas três medidas: Comprimento máximo das linhas diagonais, Tendência e Comprimento máximo das linhas verticais, utilizando a análise discriminante quadrática. Os resultados obtidos sugerem que a técnica é viável para ser empregada na classificação entre sinais de vozes saudáveis e sinais de vozes afetadas por paralisia nas dobras vocais.

Palavras-chave: medidas de quantificação de recorrência, análise discriminante linear, análise discriminante quadrática, validação cruzada, paralisia nas dobras vocais.

1. INTRODUÇÃO

Alterações introduzidas no trato vocal por patologias na laringe afetam significativamente a qualidade da voz. Exames tradicionais, como a videolaringoscopia, são invasivos, causam desconforto ao paciente, e precisam de equipamentos sofisticados, o que encarece o procedimento.

Técnicas baseadas em processamento digital de sinais de voz têm sido sugeridas para serem empregadas como ferramenta auxiliar aos exames tradicionais, uma vez que podem ser de menor custo ao paciente, e ainda permitem o compartilhamento remoto de prontuários, bem como possibilitam uma segunda opinião por meio de redes de Telemedicina (GODINO-LLORENTE et al., 2006).

Medidas tradicionais baseadas no modelo linear de produção da fala são empregadas considerando que a voz seja produzida por um conjunto fonte-filtro (laringe-trato vocal) (COSTA, 2008). Entretanto, outros estudos vêm ganhando destaque nos últimos anos, esses consideram a produção da voz humana como sendo um processo não-linear, levando em conta, entre outros fatores, a complexidade inerente à vibração das pregas vocais (JIANG et al., 2006).

Os Gráficos de Recorrência (ECKMANN et al., 1987) têm surgido como mais uma técnica de análise não-linear de sistemas dinâmicos. A análise de quantificação de recorrência surgiu como forma de potencializar as avaliações, a partir do desenvolvimento das medidas de quantificação de recorrência (WEBBER et al., 1994; MARWAN, 2003).

Um parâmetro importante na análise de quantificação de recorrência é o raio de vizinhança, o qual define os pontos recorrentes no gráfico de recorrência. Entretanto, a literatura não traz um método unânime para estabelecer um limiar ideal que possa definir os pontos recorrentes. Dessa forma, é possível investigar uma metodologia que defina um raio de vizinhança ideal (ou, pelo menos, próximo do ideal), o que depende do objetivo da análise (MARWAN, 2003).

Neste trabalho, as medidas de quantificação de recorrência são aplicadas em sinais de vozes saudáveis e sinais de vozes afetadas por paralisia nas dobras vocais, com o objetivo de investigar as melhores taxas de classificação entre as classes, quando se varia o raio de vizinhança de 1% a 15% do máximo diâmetro do espaço de fases. Para a classificação, são utilizadas a Análise Discriminante Linear (LDA) e a Análise Discriminante Quadrática (QDA), as quais permitem investigar o percentual de correta classificação por meio de validação cruzada.

O artigo está organizado como segue. Na Seção 2 é apresentada a fundamentação teórica da análise de quantificação de recorrência, em que são apresentados, brevemente, os conceitos de gráficos de recorrência e de suas medidas de quantificação. Na Seção 3 é apresentada a metodologia empregada no trabalho. Na Seção 4 são apresentados os resultados obtidos, e na Seção 5 são apresentadas as conclusões.

2. GRÁFICOS DE RECORRÊNCIA E SUAS MEDIDAS DE QUANTIFICAÇÃO

O gráfico de recorrência é uma matriz bidimensional, quadrada, na qual os seus eixos representam a evolução dos estados do sistema dinâmico. Nesta matriz são marcados pontos brancos e pretos. Um ponto preto marcado na coordenada (i, j) do gráfico de representa a recorrência do estado do sistema $x(i)$ no instante j (Eckmann et al, 1987).

A expressão matemática que define a formação do gráfico de recorrência é a seguinte (SOUZA, 2008):

$$\bar{R}_{i,j}^{m,\varepsilon} = \theta\left(\varepsilon - \|\bar{x}_i - \bar{x}_j\|\right), \quad \bar{x}_i \in \mathfrak{R}^m, \quad i, j = 1, \dots, N. \quad (1)$$

\bar{x}_i representa cada um dos N estados formados do sistema, que são obtidos por meio do método dos atrasos temporais (TAKENS, 1981), o qual imerge a série temporal num espaço m -dimensional com tempo de defasagem τ .

O raio de vizinhança, ε , é um parâmetro fundamental na construção do gráfico de recorrência. Ao calcular-se a distância entre os estados do sistema o raio de vizinhança define quais pontos estão dentro ou fora dessa vizinhança (pontos recorrentes ou não recorrentes). A função de degrau unitário, $\theta(\cdot)$, mapeia os pontos recorrentes dentro do gráfico de recorrência.

Na Figura 1 estão representados trechos de 40 ms (1000 amostras) da vogal sustentada /a/, de um sinal de voz saudável e de um sinal de voz afetado por paralisia nas pregas vocais e seus respectivos gráficos de recorrência, obtidos com valor para o raio de vizinhança de 10% do diâmetro máximo do espaço de fases. O gráfico de recorrência representativo das 1.000 amostras deste sinal de voz apresenta a formação de estruturas diagonais totalmente preenchidas e paralelas à diagonal principal. A formação de estruturas diagonais nos gráficos de recorrência é típica de sistemas oscilantes.

Comparado ao sinal de voz saudável, o sinal de voz patológico apresenta uma natureza menos periódica, e seu gráfico de recorrência apresenta uma descontinuidade maior das estruturas diagonais, bem como uma densidade menor de pontos de recorrência ao longo do gráfico.

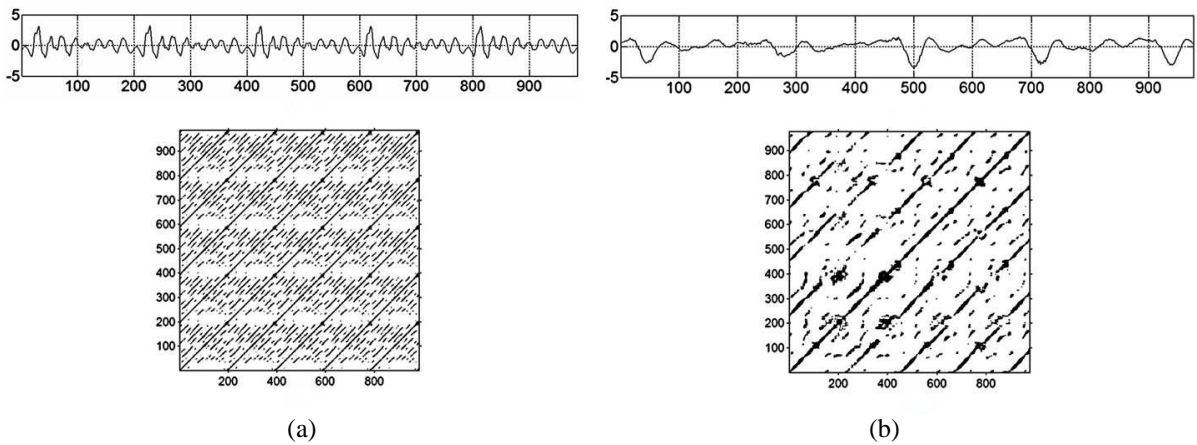


Figura 1 – Sinais de voz e seus respectivos gráficos de recorrência para: (a) Voz saudável de um sujeito de 36 anos de idade, do sexo masculino ($m=3$, $\tau=6$ e $\varepsilon=10\%$); (b) Voz afetada por paralisia nas dobras vocais de um sujeito de 42 anos de idade, do sexo feminino ($m=3$, $\tau=12$ e $\varepsilon=10\%$).

A análise visual dos gráficos de recorrência é subjetiva e pode levar a diferentes interpretações. Com o objetivo de trazer mais robustez às análises, quantificando estruturas presentes nos gráficos de recorrência, foram criadas as medidas de quantificação de recorrência (MQR), as quais são medidas complexas, desenvolvidas por Webber et al. (1994), e, posteriormente, por Marwan (2003). As principais medidas são apresentadas a seguir.

Taxa de Recorrência (REC) - Mede a densidade dos pontos de recorrência no gráfico de recorrência e é definida como

$$REC = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \tilde{R}_{i,j;i \neq j}^{m,\varepsilon} \quad (2)$$

Determinismo (DET) - Razão entre o número de pontos de recorrência que formam as estruturas diagonais e todos os pontos de recorrência. Está relacionado com a previsibilidade do sistema e é definido como

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^{\varepsilon}(l)}{\sum_{i,j}^N \tilde{R}_{i,j}^{m,\varepsilon}}, \quad (3)$$

em que, $P^{\varepsilon}(l) = \{l_i; i=1 \dots N_l\}$ representa a distribuição de frequência dos comprimentos l das estruturas diagonais no gráfico de recorrência e N_l é o número absoluto de linhas diagonais.

Comprimento médio das linhas diagonais (L) - Tempo médio que dois segmentos de uma trajetória estão próximos um do outro, podendo ser interpretado como o tempo médio de predição e é calculado da seguinte maneira:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^{\varepsilon}(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^{\varepsilon}(l)} \quad (4)$$

Comprimento máximo das linhas diagonais (L_{max}) – Mais utilizado pela análise de quantificação de recorrência do que o comprimento médio das linhas diagonais, e é definido como:

$$L_{max} = \max(\{l_i; i=1, \dots, N_l\}). \quad (5)$$



Entropia de Shannon (*ENTR*) - Representa a distribuição de frequências dos comprimentos das linhas diagonais e reflete a complexidade da estrutura determinística presente no sistema, sendo definida da seguinte maneira:

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l),$$

em que $p(l) = \frac{P^{\epsilon}(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^{\epsilon}(l)}$. (6)

Tendência (*TREND*) - É um coeficiente de regressão linear sobre a densidade dos pontos de recorrência das diagonais paralelas a diagonal principal (linha de identidade). Essa medida fornece informações a respeito da não-estacionaridade do processo e é definida por:

$$TREND = \frac{\sum_{i=1}^{\tilde{N}} (i - \tilde{N} / 2)(REC_i - \langle REC_i \rangle)}{\sum_{i=1}^{\tilde{N}} (i - \tilde{N} / 2)^2}. \quad (7)$$

Laminaridade (*LAM*) - Razão entre os pontos de recorrência que formam as estruturas verticais e todo o conjunto de todos os pontos de recorrência presentes no gráfico e é definida como:

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^{\epsilon}(v)}{\sum_{i,j}^N \tilde{R}_{i,j}^{m,\epsilon}}, \quad (8)$$

em que v é o tamanho da estrutura vertical, $P^{\epsilon}(v)$ é a probabilidade dessa estrutura vertical ocorrer dentro do Gráfico de Recorrência e v_{\min} é o número mínimo de estruturas verticais que se deseja contabilizar.

Comprimento médio das estruturas verticais (*TT*) - Também conhecida como tempo de permanência em um estado (*Trapping Time*), essa medida contém informação acerca da quantidade e do comprimento das estruturas verticais no gráfico de recorrência. Ela mede o tempo médio que o sistema permanece em um estado específico.

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^{\epsilon}(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P^{\epsilon}(l)}. \quad (9)$$

Comprimento máximo das estruturas verticais (V_{\max}) - Fornece o tempo máximo em que um estado permanece em um estado laminar:

$$V_{\max} = \max(\{v_i; i = 1, \dots, N_v\}). \quad (10)$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

São analisados, neste trabalho, 108 sinais de vozes (53 sinais de vozes saudáveis e 55 sinais de vozes afetadas por paralisia nas dobras vocais), oriundos da base de dados, *Disordered Voice Database, Model 4337*, da *Kay Elemetrics*, desenvolvido pelo *Massachusetts Eye and Ear Infirmary (MEEI) Voice and Speech Lab* (ELEMETRICS, 1994). Cada sinal, obtido da vogal sustentada /a/ e amostrado a uma taxa de 25 kHz, é analisado em um trecho de 400 ms (10.000 amostras).

Os parâmetros de imersão no sistema de produção da fala (a dimensão de imersão, m , e o passo de reconstrução, τ), são obtidos por meio do *software Visual Recurrence Analysis - VRA* (KONONOV, 2006). A análise de quantificação de recorrência, da qual são extraídas as medidas de quantificação de recorrência (MQR), é realizada por meio do pacote de rotinas *Recurrence Quantification Analysis - RQA software 13.1* (WEBBER, 2009).



As MQR são extraídas de cada sinal de voz, considerando a variação do raio de vizinhança entre 1% e 15% do diâmetro máximo do espaço de fases (máxima distância calculada entre os vetores que representam os estados do sistema). É investigado o potencial discriminativo das medidas de quantificação de recorrência em classificar os sinais como saudáveis ou patológicos, empregando a Análise Discriminante Linear (*Linear Discriminant Analysis – LDA*) e a Análise Discriminante Quadrática (*Quadratic Discriminant Analysis – QDA*). A LDA procura uma máxima separabilidade entre classes por meio de transformações lineares que buscam um sistema de coordenadas ótimo, o qual melhor represente a separação (SANTOS, 2005). Já a QDA utiliza funções quadráticas para definir regiões de separação entre as classes (SIMEÃO, 2007).

Para a avaliação de desempenho são aplicadas as seguintes medidas: Verdadeiro Positivo (VP), que representa a relação entre os sinais patológicos corretamente classificados e o número total de sinais patológicos; Verdadeiro Negativo (VN), que é a relação entre os sinais classificados como saudáveis e que, realmente, não apresentam a patologia; e a Acurácia (Ac), que fornece a relação entre todos os sinais corretamente classificados e o número total de sinais.

O método da validação cruzada é empregado dividindo o conjunto de dados (contendo os resultados das MQR) em n partes. Dessas, $n-1$ são utilizadas na fase de treino do classificador, e a parte restante é utilizada na fase de teste. O procedimento se repete n vezes, de maneira que todas as partes (*folds*) sejam empregadas na fase de teste (SANTOS et al., 2009).

Neste trabalho, a validação cruzada é realizada com n igual a 10, de modo a averiguar com qual valor de raio cada MQR obtém melhor Acurácia média. A classificação também é realizada de forma combinada entre as MQR, considerando os resultados para cada medida no raio de vizinhança no qual obtém os melhores valores de Acurácia média.

4. RESULTADOS

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados os melhores valores para a Acurácia (Ac), Verdadeiro Positivo (VP) e Verdadeiro Negativo (VN) obtidos a partir da classificação de cada medida de quantificação de recorrência (MQR), individualmente, e os seus correspondentes valores de raio de vizinhança, quando aplicadas a análise discriminante linear e a análise discriminante quadrática, respectivamente, para a classificação de sinais de vozes saudáveis e sinais de vozes afetadas por paralisia nas dobras vocais.

Tabela 1 – Avaliação do desempenho individual das medidas de quantificação de recorrência (MQR) com a análise discriminante linear.

MQR	Ac (%)	ε (%)	VP (%)	VN (%)
<i>REC (%)</i>	67,64 ± 13,46	2	78,33 ± 22,78	57,00 ± 18,75
<i>DET (%)</i>	90,82 ± 9,59	2	83,67 ± 20,63	98,00 ± 6,32
<i>L_{max}</i>	91,73 ± 9,05	5	98,33 ± 5,27	85,33 ± 18,34
<i>ENTR</i>	90,82 ± 7,43	2	83,67 ± 15,75	98,00 ± 6,32
<i>Trend</i>	69,45 ± 8,51	2	89,33 ± 15,38	49,00 ± 15,95
<i>LAM (%)</i>	67,45 ± 13,54	13	40,33 ± 23,54	96,67 ± 10,54
<i>V_{max}</i>	70,36 ± 14,69	5	58,67 ± 21,33	82,33 ± 19,88
<i>TT</i>	56,55 ± 9,42	11	43,00 ± 15,51	69,00 ± 26,01

Ac -Acurácia, VP - Verdadeiro Positivo e VN - Verdadeiro Negativo

Observando as Tabelas 1 e 2, é possível perceber que as medidas de quantificação de recorrência que obtêm melhores valores de acurácia são aquelas baseadas em estruturas diagonais presentes nos gráficos de recorrência: Determinismo (*DET*), comprimento máximo das linhas diagonais (L_{max}) e Entropia de Shannon (*ENTR*). Além disso, esses valores máximos de acurácia são obtidos para valores baixos de raio de vizinhança. Tanto na aplicação da análise discriminante linear quanto na aplicação da análise discriminante quadrática, a MQR que tem melhor acurácia é a que mede o comprimento máximo das linhas diagonais (L_{max}). Este resultado representa o padrão diferenciado no comportamento das linhas diagonais no gráfico de recorrência para o sinal de voz saudável e o sinal de voz patológica, que pode ser observado nos exemplos da Figura 1.

Tabela 2 – Avaliação do desempenho individual das medidas de quantificação de recorrência (MQR) com a análise discriminante quadrática.

MQR	Ac (%)	ε (%)	VP (%)	VN (%)
<i>REC</i> (%)	70,55 ± 9,91	4	65,00 ± 14,25	76,00 ± 13,86
<i>DET</i> (%)	89,82 ± 6,69	2	85,67 ± 11,01	94,67 ± 11,67
L_{max}	93,64 ± 6,14	6	92,67 ± 9,53	94,67 ± 8,64
<i>ENTR</i>	90,73 ± 7,43	2	85,67 ± 11,01	96,00 ± 8,43
<i>Trend</i>	64,09 ± 12,75	15	41,33 ± 19,13	87,00 ± 15,27
<i>LAM</i> (%)	65,82 ± 5,59	13	36,00 ± 14,04	96,00 ± 8,43
V_{max}	67,64 ± 12,30	12	47,00 ± 23,06	89,33 ± 14,47
<i>TT</i>	64,18 ± 14,03	15	44,33 ± 18,13	85,33 ± 18,34

Ac -Acurácia, VP - Verdadeiro Positivo e VN - Verdadeiro Negativo

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2, obtém-se informação a respeito dos valores de raio de vizinhança nos quais são obtidos os valores máximos de acurácia para cada medida de quantificação de recorrência. É formado um novo conjunto de dados contendo os valores das MQR nos seus respectivos “raios ótimos”, quando aplicadas a LDA e a QDA, a fim de se combinar essas medidas (as MQR), e verificar qual combinação obtém o maior valor de acurácia.

Na Figura 4 estão representados os valores de acurácia média máxima, obtidos na análise discriminante com as funções linear e quadrática, quando aplicadas na validação cruzada de forma individual e combinada.

Na análise discriminante linear, quando são combinadas as MQR, os melhores valores de acurácia média máxima são obtidos nas combinações de três, quatro e cinco medidas. As três medidas com melhor desempenho são *REC*, *ENTR* e V_{max} , com uma acurácia média máxima de 95,36 ± 6,51%. As quatro medidas combinadas com maior acurácia média máxima de 95,36 ± 4,89% são *REC*, *ENTR*, *Trend* e V_{max} . A combinação de cinco medidas que obtém acurácia média máxima de 95,36 ± 4,89% são *REC*, *DET*, *ENTR*, *Trend* e V_{max} .

Na análise discriminante quadrática, o melhor valor de acurácia média máxima, 98,18 ± 3,83%, é obtido com a combinação de apenas três medidas: L_{max} , *Trend* e V_{max} . A combinação de quatro medidas (*REC*, L_{max} , *Trend* e V_{max}) apresenta uma acurácia média máxima de 98,09 ± 4,03, resultado próximo àquele obtido na combinação das três medidas.

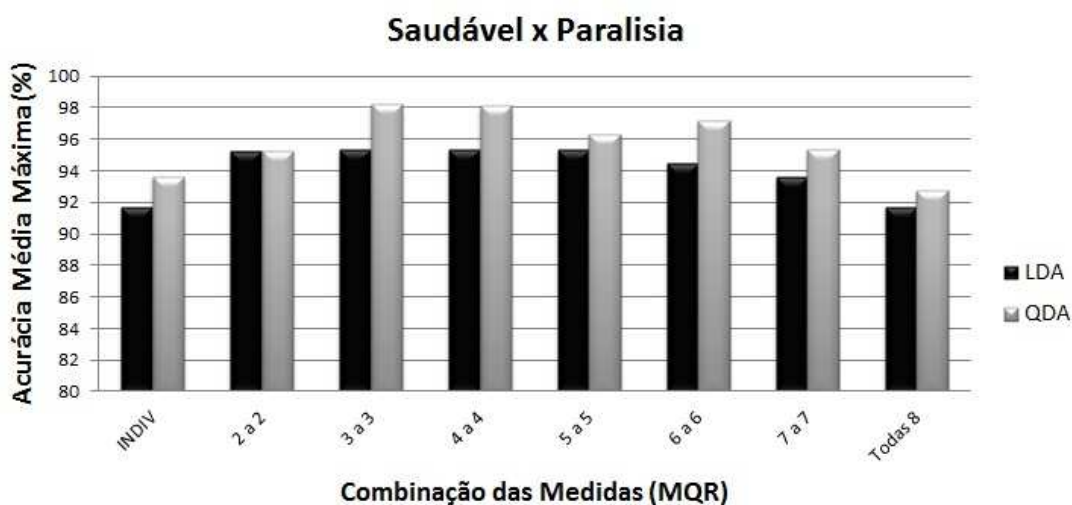


Figura 4 – Valores de Acurácia média máxima obtida das medidas de quantificação de recorrência (MQR) de forma individual e combinada, com a aplicação da análise discriminante linear (LDA) e da análise discriminante quadrática (QDA).

5. CONCLUSÕES

Os resultados da classificação entre vozes saudáveis e vozes afetadas por patologia laríngeas, indicam que as melhores taxas de classificação são obtidas com valores diferentes de raio de vizinhança para cada medida de quantificação de recorrência. Isto decorre do fato de que cada medida representa as desordens vocais provocadas pela patologia de forma distinta, de forma que o tamanho do raio representa o quanto cada medida precisa detalhar a observação para conseguir capturar essas desordens.

Embora as funções discriminantes linear e quadrática apresentem resultados próximos na análise individual das medidas, os melhores resultados, com as combinações, foram obtidos com a função quadrática. Quando são combinadas, considerando seus respectivos valores “ótimos” de raio de vizinhança, as MQR apresentam uma maior capacidade de classificação, principalmente na combinação de três medidas (L_{max} , $Trend$ e V_{max}), em que obtiveram mais de 98% de acurácia média. Dessa forma, não há necessidade da utilização de mais de três medidas, dentre as medidas empregadas, para discriminar entre vozes saudáveis e vozes afetadas por paralisia nas pregas vocais. Quanto menor a quantidade de medidas, menor o custo computacional para a obtenção de uma melhor precisão e maior rapidez no diagnóstico.

A análise de quantificação de recorrência é uma técnica nova, ainda pouco utilizada em análise de voz. Entretanto, os resultados obtidos sugerem que a viabilidade da técnica para ser empregada como ferramenta de apoio em atendimento clínico para auxílio ao diagnóstico de patologias laríngeas. Sugere-se, como trabalhos futuros, a aplicação da técnica na detecção de outras patologias laríngeas, bem como no acompanhamento de tratamentos médicos e terapia vocal.

AGRADECIMENTOS

Ao IFPB, ao CNPq pelo financiamento parcial, e à UFCG pelo banco de dados.



REFERÊNCIAS

- COSTA, S. C. **Análise Acústica, Baseada no Modelo Linear de Produção da Fala, para Discriminação de Vozes Patológicas**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2008.
- ECKMANN, J. P.; KAMPHORST S. O.; RUELLE, D. **Recurrence plots of dynamical systems**. *Europhys. Lett.*, 56(5):973–977, 1987.
- ELEMETRICS, K. **Kay Elemetrics Corp. Disordered Voice Database**. Model 4337, 03 Ed., 1994.
- GODINO-LLORENTE, J. I.; GOMES-VILDA, P.; BLANCO-VELASCO, M. **Dimensionality reduction of a pathological voice quality assessment system based on gaussian mixture models and short-term cepstral parameters**. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53(10), pp. 1943–1953, 2006.
- JIANG, J.; ZHANG, Y.; MCGILLIGAN, C. **Chaos in voice, from modeling to measurement**. *Journal of Voice*, vol. 20 (1), pp. 2–17, January 2006.
- KONONOV, E. **Visual Recurrence Analysis, v. 4.9**. March 2006. *Software* disponível em: <<http://nonlinear.110mb.com/vra/>> Acesso em: 29 ago 2011.
- MARWAN, N. **Encounters With Neighbours - Current Developments of Concepts Based on Recurrence Plots and Their Applications**. Ph.D. thesis, University of Potsdam, 2003.
- SANTOS, A. R. **Identificação de Faces Humanas através de PCA-LDA e Redes Neurais SOM**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP), 2005.
- SANTOS, L. D. M.; MIKAMI, R.; VENDRAMIN, A. C. B. K.; KAESTNER, C. A. A. **Procedimentos de Validação Cruzada em Mineração de Dados para Ambiente de Computação Paralela**. In: ERAD 2009 - 9a. Escola Regional de Alto Desempenho - Arquiteturas Multicore. Caxias do Sul –RS, Brasil, 2009.
- SIMEÃO, S. F. A. P. **Aplicativo Computacional da Função Discriminante Quadrática para Utilização em Ciências Experimentais**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2007.
- SOUZA, E. G. **Caracterização de Sistemas Dinâmicos através de Gráficos de Recorrência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2008.
- TAKENS, F. **Detecting strange attractors in turbulence Dynamical Systems and Turbulence**. In: *Lecture Notes in Mathematics*, edited by D. Rand and L.-S. Young, pp. pp 366–381. Berlin: Springer, 1981.
- WEBBER, C. L.; ZBILUT, J. P. **Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plots strategies**. *J. Appl. Physiol.*, 76:965-973, 1994.
- WEBBER, C. L. **Recurrence Quantification Analysis, v. 13.1**. June 2009. *Software package* disponível em: <<http://homepages.luc.edu/~cwebber/>> Acesso em 29 ago 2011.