

ANÁLISE DE QUANTIFICAÇÃO DE RECORRÊNCIA PARA A CARACTERIZAÇÃO DE SINAIS DE VOZES SAUDÁVEIS E VOZES PATOLÓGICAS

Washington C. de A. Costa, Silvana Cunha Costa, Vinícius J. D. Vieira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
washington.cesar@ifpb.edu.br, silvana@ifpb.edu.br, viniciusjdv@gmail.com

Benedito G. Aguiar Neto, F. M. de Assis

Universidade Federal de Campina Grande
{bganeto, fmarcos}@dee.ufcg.edu.br

Resumo – Neste trabalho a técnica de análise de quantificação de recorrência é aplicada na caracterização de sinais de vozes saudáveis e de sinais de vozes afetadas por diferentes patologias da laringe (edema de Reinke, paralisia e nódulos nas pregas vocais). Sete medidas de quantificação (a taxa de recorrência, o determinismo, o comprimento máximo das linhas diagonais, a entropia de Shannon da distribuição de frequências dos comprimentos das linhas diagonais, a laminaridade, o comprimento máximo das linhas verticais e o tempo de permanência em um estado) são extraídas dos gráficos de recorrência dos sinais analisados. O potencial discriminativo dessas medidas é investigado por meio de testes estatísticos. Os resultados mostram que as medidas utilizadas apresentam diferenças estatisticamente significativas entre os dois grupos de sinais. Isto significa que as medidas empregadas podem, em potencial, serem utilizadas em um sistema de classificação capaz de discriminar sinais de vozes afetadas pelas patologias analisadas de sinais de vozes saudáveis.

Palavras-chave – Análise não-linear, medidas de quantificação de recorrência, processamento digital de sinais de voz e patologias da laringe.

Abstract – In this work the quantification recurrence analysis is applied to characterize healthy voices and voices affected by different laryngeal pathologies (Reinke's edema, vocal fold paralysis and nodules). Seven quantification measures (the recurrence rate, the determinism, the maximal length of diagonal structures, the Shannon information entropy of line distribution, the laminarity, the maximal length of vertical structures and the trapping time) are extracted from recurrence plots of the analyzed signals. The discriminative potential of such measures is investigated by means of statistical tests. The results show that the measures used have significant statistically differences between the two groups of signals. This means that the measures employed may, potentially, be used in a classification system capable of discriminating voices affected by the analyzed laryngeal pathologies of healthy voices.

Keywords – Nonlinear analysis, recurrence quantification measures, digital processing of speech signals and laryngeal pathologies.

1. INTRODUÇÃO

O interesse pela análise acústica na avaliação da qualidade vocal tem crescido muito nos últimos anos [1–3]. A análise acústica é uma técnica não-invasiva baseada no processamento digital de sinais de voz, podendo ser empregada como uma ferramenta eficiente para o auxílio ao diagnóstico de distúrbios vocais, classificação de doenças da voz e, particularmente, sua pré-deteção. Além disso, essa técnica pode ser utilizada para a determinação objetiva de alterações da função vocal, avaliações de cirurgias, tratamentos farmacológicos e de reabilitação [1].

Há uma grande variedade de doenças relacionadas à laringe que causam modificações na voz. Essas patologias podem ser tanto de origem orgânica como nódulos, cistos ou edemas, quanto de origem neurológica, tais como paralisia nas dobras vocais e distúrbios causados pelo mal de Parkinson [4]. Algumas dessas patologias como pólipos, nódulos e edemas de Reinke, por exemplo, ocorrem, principalmente, devido a hábitos sociais não-saudáveis como tabagismo e alcoolismo e ao abuso vocal. No caso de paralisia, as principais causas incluem traumas cirúrgicos ou acidentais, doença cardiovascular e doenças neurológicas [5].

Um sistema de análise vocal baseado em algoritmos computacionais pode ser aplicado em redes de Telemedicina, que oferecem serviços como compartilhamento de arquivos de prontuários, consultas, exames e segunda opinião. Além disso, é possível a adoção de medidas simples e de baixo custo, como a implantação de sistemas de análise de imagens médicas com diagnósticos remotos, que podem contribuir muito para diminuir a carência de especialistas, além de proporcionar treinamento e capacitação de profissionais da área médica sem o deslocamento destes para os centros de referência.

Para que um sistema computacional de auxílio a diagnósticos possa ser implementado com eficiência, ou seja, com altas taxas de acerto na classificação, um dos aspectos primordiais é a escolha das características ou parâmetros que representem

significativamente as desordens da fala introduzidas por uma patologia. As técnicas baseadas na análise linear do modelo de produção de voz tem sido as mais empregadas para discriminação de vozes patológicas. Entretanto, um modelo detalhado do processo de produção da voz deve levar em consideração fatores como: variação temporal da forma do trato vocal, as ressonâncias associadas à sua fisiologia, as perdas devido ao atrito viscoso nas paredes internas do trato vocal, a suavidade dessas paredes internas, a radiação do som nos lábios, o acoplamento nasal e a flexibilidade (comportamento dinâmico) associada à vibração das dobras vocais [6]. A utilização de um modelo linear para a produção da voz humana não consegue modelar eficientemente todos esses fatores, o que leva à busca de estudos com o objetivo de incorporar modelos não-lineares para representar a produção da voz [2].

Nas duas últimas décadas, os gráficos de recorrência [7] têm surgido como mais uma técnica de análise não-linear para o estudo de sistemas dinâmicos. A principal vantagem da análise baseada nos gráficos de recorrência é a possibilidade do uso dessa técnica para análise de séries curtas e não-estacionárias [8]. Os gráficos de recorrência exibem padrões característicos de pequena e larga escala presentes nos comportamentos típicos dos sistemas dinâmicos. Entretanto, as estruturas apresentadas nos gráficos de recorrência nem sempre são de fácil interpretação podendo, numa análise subjetiva, levar a diferentes resultados.

Como forma de quantificar o comportamento do sistema sob análise, facilitando a análise dos dados e tornando-a mais confiável, Zbilut e Webber [9] desenvolveram a análise de quantificação de recorrência baseada em um conjunto de medidas objetivas a partir dos gráficos de recorrência [10]. As medidas inicialmente propostas - a taxa de recorrência, o determinismo, o comprimento máximo das linhas diagonais, a entropia de Shannon da distribuição de frequências dos comprimentos das linhas diagonais e a tendência - estão relacionadas à densidade dos pontos de recorrência e às estruturas diagonais presentes nos gráficos de recorrência. Posteriormente, Marwan [8] propôs outras três medidas de recorrência, desta vez baseadas nas estruturas verticais (ou horizontais), são elas: a laminaridade, o tempo de permanência e o comprimento máximo das estruturas verticais.

Neste trabalho, sinais de vozes saudáveis e com desordens vocais provocadas por patologias laríngeas (edemas de Reinke, nódulos e paralisia nas dobras vocais), são analisadas por meio de medidas de quantificação de recorrência (taxa de recorrência, determinismo, comprimento máximo das linhas diagonais, entropia de Shannon da distribuição de frequências dos comprimentos das linhas diagonais, laminaridade, comprimento máximo das linhas verticais e tempo de permanência em um estado). As medidas obtidas a partir dos sinais afetados por patologias são comparadas, estatisticamente, com as mesmas medidas obtidas para vozes saudáveis. Pretende-se investigar o potencial discriminativo dessas medidas para utilizá-las no desenvolvimento de uma ferramenta computacional, que sirva de apoio ao diagnóstico médico das patologias citadas.

2. GRÁFICOS DE RECORRÊNCIA

Alguns processos naturais podem apresentar comportamentos recorrentes periódicos, como também processos cíclicos irregulares. De qualquer forma, a recorrência de estados, dentro de uma vizinhança arbitrária, é uma propriedade fundamental dos sistemas dinâmicos determinísticos e é típica de sistemas não-lineares ou caóticos [8].

Eckmann et al. [7] propuseram uma ferramenta de análise capaz de representar os estados recorrentes de um sistema evoluindo em um espaço de fase m -dimensional por meio de uma representação bidimensional. Esta representação é chamada gráfico de recorrência (*RP - Recurrence Plot*).

Em um *RP* a recorrência do sistema a um estado anteriormente assumido (não necessariamente idêntico, mas arbitrariamente próximo àquele) é representada por meio de uma matriz quadrada constituída de pontos brancos e pontos pretos, em que estes simbolizam uma recorrência. Um gráfico de recorrência pode ser matematicamente expresso como [8]

$$\mathcal{R}_{i,j}^{m,\varepsilon_j} = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad \vec{x}_i \in \mathbb{R}^m, \quad i, j = 1 \dots N \quad (1)$$

em que N é o número de estados considerados x_i ; ε_i é um limiar de distância, $\|\cdot\|$ uma norma e $\Theta(\cdot)$ a função degrau unitário.

2.1 Os Estados do Sistema

De uma maneira geral, um experimento não mede todas as variáveis de estado do sistema e, usualmente, tem-se disponível a evolução no tempo de apenas uma variável de estado, representado por uma série temporal, $x(t)$, que representa a trajetória de um dado sistema dinâmico [11]. Neste caso, a série temporal disponível é o próprio sinal de voz digitalizado. A partir deste é realizada a reconstrução da dinâmica do sistema de produção da voz com a utilização de técnicas de reconstrução do espaço de estados.

A técnica de reconstrução do espaço de estados é baseada no teorema da imersão de Takens [12]. Este teorema permite reconstruir um espaço de estado m -dimensional similar ao espaço de estado original, d -dimensional, a partir de uma única variável de estado, a variável medida [11]. Assim, vetores \vec{x}_i m -dimensionais são construídos a partir do sinal de voz $x(t)$ disponível e de suas $m - 1$ versões defasadas no tempo,

$$\vec{x}_i = \{x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots, x(t_i + (m - 1)\tau)\} \quad (2)$$

em que m é a chamada dimensão de imersão e τ é o passo de reconstrução ou tempo de defasagem.

A determinação de valores adequados para os chamados parâmetros de imersão (τ e m) é de fundamental importância para a reconstrução do espaço de estado do sistema de forma satisfatória.

Na Figura 1 estão ilustradas três diferentes formas de apresentação para um trecho de 40 ms da vogal sustentada /a/ de um sinal de voz saudável.

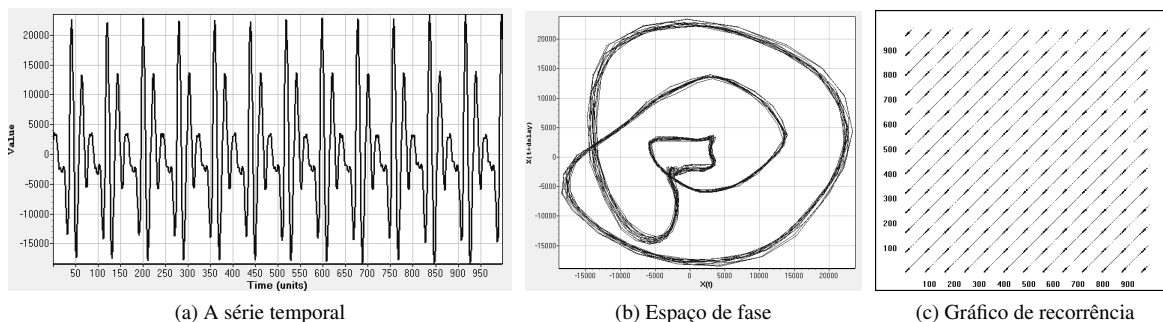


Figura 1: Representações da vogal sustentada /a/ para uma voz saudável. (a) A série temporal, (b) o espaço de fase e (c) gráfico de recorrência.

A natureza aproximadamente periódica observada na série temporal do sinal (Fig. 1a) está representada por uma figura aproximadamente circular no espaço de fase (Fig. 1b) e pela presença de várias linhas diagonais no gráfico de recorrência (Fig. 1c) do sinal analisado.

2.2 O Limiar de Distância (raio)

Em geral, as distâncias entre todas as combinações dos vetores m -dimensionais representando os estados do sistema podem ser avaliadas por meio de um dos três tipos de norma: a norma mínima, a norma máxima ou a norma euclidiana [13]. A partir do cálculo da distância entre os vetores é formada uma matriz quadrada de ordem igual ao número de estados do sistema denominada Matriz Distância.

A escolha do limiar de distância (ou raio), ε , é geralmente expresso em unidades relativas aos elementos da Matriz Distância, tenham sido estes re-escalonados ou não [13]. Considerando o valor do raio constante para o cálculo de todas as normas de uma mesma matriz distância, o gráfico de recorrência é necessariamente simétrico em relação à sua diagonal principal. Assim, o cálculo das medidas é realizado apenas sobre uma área triangular da matriz de recorrência, excluindo-se a diagonal principal onde as distâncias são sempre iguais a zero.

3. MEDIDAS DE QUANTIFICAÇÃO DE RECORRÊNCIA

A análise de quantificação de recorrência teve seu início com o desenvolvimento das medidas de complexidade propostas por Zbilut e Webber [9, 14]. As medidas por eles propostas, descritas a seguir, fazem uso da densidade dos pontos de recorrência e das estruturas diagonais presentes nos gráficos de recorrência [8].

A taxa de recorrência ou percentual de recorrência (*Rec*) simplesmente mede a densidade dos pontos de recorrência no *RP* e é definida como

$$Rec = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \mathcal{R}_{i,j}^{m,\varepsilon}. \quad (3)$$

A razão entre o número de pontos de recorrência que formam as estruturas diagonais e todos os pontos de recorrência é introduzida como uma medida chamada determinismo (*Det*), que está relacionada com a previsibilidade do sistema e é definida como

$$Det = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P^\varepsilon(l)}{\sum_{i,j}^N \mathcal{R}_{i,j}^{m,\varepsilon}}, \quad (4)$$

em que, $P^\varepsilon(l) = \{l_i; i = 1 \dots N_l\}$ representa a distribuição de frequência dos comprimentos l das estruturas diagonais no *RP* e N_l é o número absoluto de linhas diagonais. O limiar l_{min} exclui as linhas diagonais que são formadas pelo movimento tangencial da trajetória no espaço de fase.

As estruturas diagonais mostram a distância em que um segmento da trajetória está em relação a outro segmento da mesma trajetória em outro instante de tempo. Assim, estas linhas informam sobre a divergência dos segmentos da trajetória. O comprimento médio das linhas diagonais, L , é definido como o tempo médio que dois segmentos de uma trajetória estão próximos um do outro e pode ser interpretado como o tempo médio de previsão. L é calculado da seguinte forma

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P^\varepsilon(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P^\varepsilon(l)}. \quad (5)$$

A análise de quantificação de recorrência utiliza o comprimento máximo das estruturas diagonais (ou sua inversa, a divergência), ao invés do comprimento médio. Assim,

$$L_{max} = \max(\{l_i; i = 1 \dots N_l\}) \quad \text{e} \quad DIV = \frac{1}{L_{max}}. \quad (6)$$

Outra medida de quantificação é a entropia de Shannon da distribuição de frequências dos comprimentos das linhas diagonais e reflete a complexidade da estrutura determinística presente no sistema.

$$Entr = - \sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln p(l) \quad \text{com} \quad p(l) = \frac{P^\varepsilon(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P^\varepsilon(l)} \quad (7)$$

Mais recentemente, Marwan [8] propôs três outras medidas de análise de recorrência baseadas na estruturas verticais (ou horizontais) presentes nos gráficos de recorrência. As novas medidas são descritas a seguir.

A relação entre os pontos de recorrência formando as estruturas verticais e todo o conjunto dos pontos de recorrência é denominada de laminaridade e calculada como

$$Lam = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P^\varepsilon(v)}{\sum_{v=1}^N v P^\varepsilon(v)}. \quad (8)$$

A laminaridade é a medida da quantidade de estruturas verticais em todo o *RP* e representa a ocorrência de estados laminares do sistema, sem, contudo, determinar o comprimento destas etapas laminares.

O comprimento médio das estruturas verticais é chamado de tempo de permanência em um estado, e é dado por

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

A medida *TT* contém informação acerca da quantidade e do comprimento das estruturas verticais no *RP*. Ela mede o tempo médio que o sistema permanece em um estado específico.

A última medida trata do comprimento máximo das estruturas verticais presentes no gráfico de recorrência, calculado de forma análoga à medida L_{max} , Eq.(6), ou seja,

$$V_{max} = \max\{V_l; l = 1 \dots L\}. \quad (10)$$

4. METODOLOGIA

O objetivo principal deste trabalho é investigar a aplicação das medidas de quantificação de recorrência na caracterização de sinais de vozes saudáveis e vozes patológicas. Para tanto foi utilizado um banco de dados comercial fornecido pela *Kay Elemetrics* [15]. Deste banco de dados foram utilizados 171 sinais de vozes da vogal sustentada /a/, sendo 53 sinais de vozes saudáveis e 118 de vozes afetadas por algum tipo de patologia na dobras vogais (45 com edema, 55 com paralisia e 18 com nódulo).

Os sinais de vozes saudáveis, originalmente amostrados a uma frequência de amostragem de 50 kHz, foram re-amostrados a uma taxa de 25 kHz - mesma taxa de amostragem dos sinais de vozes patológicas. Para efeito de análise dos sinais foi considerado um conjunto de 10.000 amostras (400 ms), extraídas na faixa entre 100 ms e 500 ms, visando excluir os efeitos iniciais presentes no processo de gravação.

O primeiro passo realizado foi a determinação dos parâmetros de imersão (τ e m) visando a obtenção dos vetores responsáveis pela reconstrução do espaço de estados do sistema de produção da voz. Neste trabalho foi utilizado o *software Visual Recurrence Analysis* (VRA) [16] para a obtenção dos valores ideais destes parâmetros. O VRA utiliza como método que estima o valor ideal de τ como sendo o primeiro mínimo da função de informação mútua média [17] e o método baseado na determinação dos falsos vizinhos próximos [18] para a determinação da dimensão de imersão mínima. Após a determinação dos parâmetros de imersão do sinal, um total de $N = 10.000 - (m - 1)\tau$ vetores m -dimensionais são construídos.

Realizado o processo de imersão, o pacote de rotinas *RQA - software13.1* [19] foi utilizado para obtenção das medidas de quantificação relativas à análise de recorrência. Após a determinação dos vetores representativos da dinâmica do sinal de voz, uma matriz de distâncias é então formada calculando-se a norma euclidiana entre eles. A etapa seguinte é a escolha do limiar de distância (ou raio), ε , a fim de se construir a matriz de recorrência. No *software RQA* o valor do raio é sempre relativo a máxima distância entre os vetores (*Maxdist*).

Quanto maior o raio mais ampla é a vizinhança para se determinar a recorrência dos estados de um sistema. Assim, caso o valor do limiar de distância seja fixado muito alto, algumas medidas como a taxa de recorrência e o determinismo tenderão a saturar em 100%. Portanto, o valor escolhido para o raio deve ser baixo, mas não tão baixo a ponto de levar a taxa de recorrência a se aproximar de zero [19].

Entre os três diferentes procedimentos propostos por Webber e Zbilut [13] para a determinação adequada do raio, o método escolhido para ser utilizado neste trabalho está baseado na obtenção de um valor para ε que assegure a manutenção de uma baixa taxa de recorrência (tipicamente menor ou igual a 5%). A taxa de recorrência quantifica a porcentagem de pontos de recorrência dentro do raio especificado.

Nos experimentos realizados foi investigado o comportamento do limiar de distância de modo que a taxa de recorrência estivesse abaixo de cinco diferentes patamares, ou seja, 1%, 2%, 3%, 4% e 5%.

Na Figura 2 estão apresentadas as distribuições dos valores do maior raio que mantém uma taxa de recorrência menor ou igual a 1% e 5%, respectivamente.

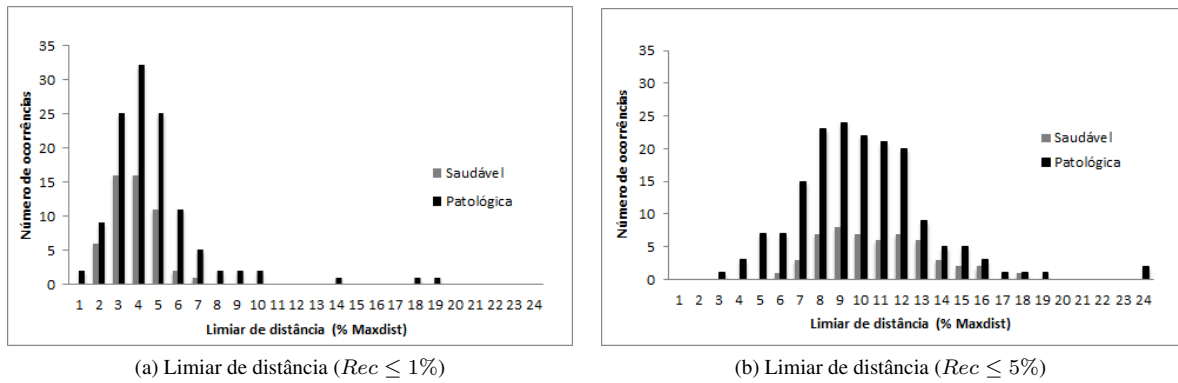


Figura 2: Distribuições dos valores do maior raio para sinais de vozes saudáveis e patológicas (a) $Rec \leq 1\%$, (b) $Rec \leq 5\%$.

Como pode ser observado, há uma maior concentração dos valores do maior raio que garante uma taxa de recorrência menor ou igual a 1% (Fig. 2a) na faixa entre 3% a 5% da máxima distância entre os vetores ($Maxdist$), tanto para vozes saudáveis ($\mu = 4$; $\sigma = 1,13$) como para vozes patológicas ($\mu = 5$; $\sigma = 2,63$). Entretanto, para alguns sinais de vozes patológicas estes valores vão além do máximo encontrado para as vozes saudáveis (7% da $Maxdist$) atingindo até 19% da $Maxdist$. Para uma taxa de recorrência máxima de 5%, (Fig. 2b), os valores do raio aparecem mais largamente distribuídos numa faixa de valores superior ao caso anterior, para ambos os grupos de sinais. Sendo ($\mu = 11$; $\sigma = 2,64$) para as vozes saudáveis e ($\mu = 10$; $\sigma = 3,41$) no caso das vozes patológicas.

5. RESULTADOS

Nas Figuras 3–8 estão representados os valores encontrados para as medidas determinismo (%), comprimento máximo das linhas diagonais (L_{max}), entropia de Shannon da distribuição de frequências dos comprimentos das linhas diagonais, laminaridade (%), comprimento máximo das linhas verticais (V_{max}) e tempo de permanência em um estado ($TT - traptime$) relativas aos 53 sinais de vozes saudáveis e 118 sinais de vozes patológicas analisados neste trabalho. Estão ilustrados os valores destas medidas para dois diferentes limitantes aplicados à taxa de recorrência: 1% e 5%.

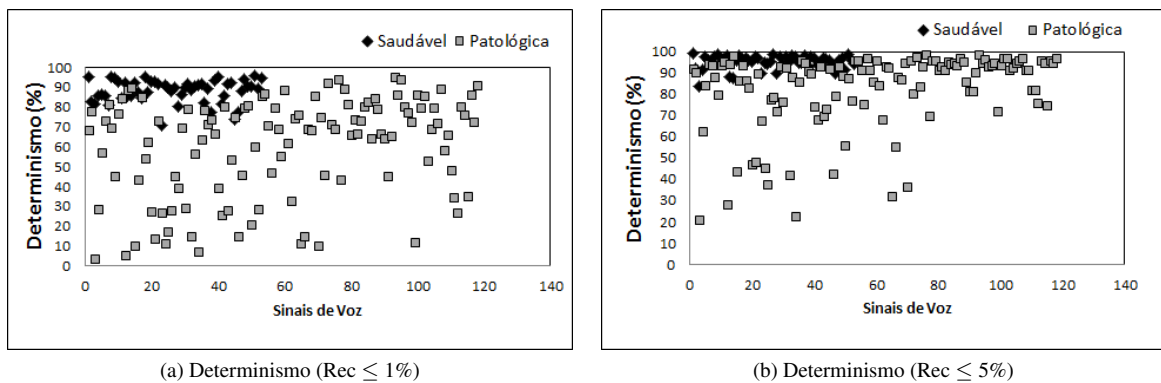


Figura 3: Distribuições dos valores do determinismo para sinais de vozes saudáveis e patológicas.

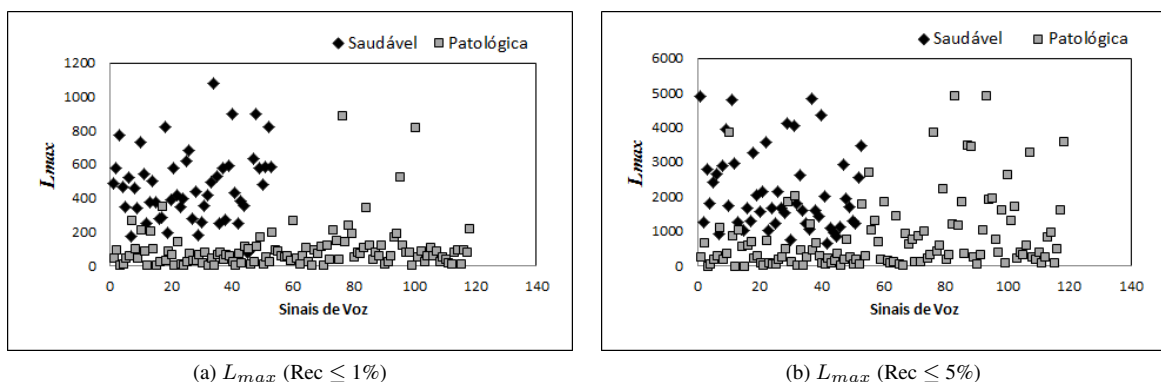


Figura 4: Distribuições dos valores do comprimento máximo das linhas diagonais para sinais de vozes saudáveis e patológicas.

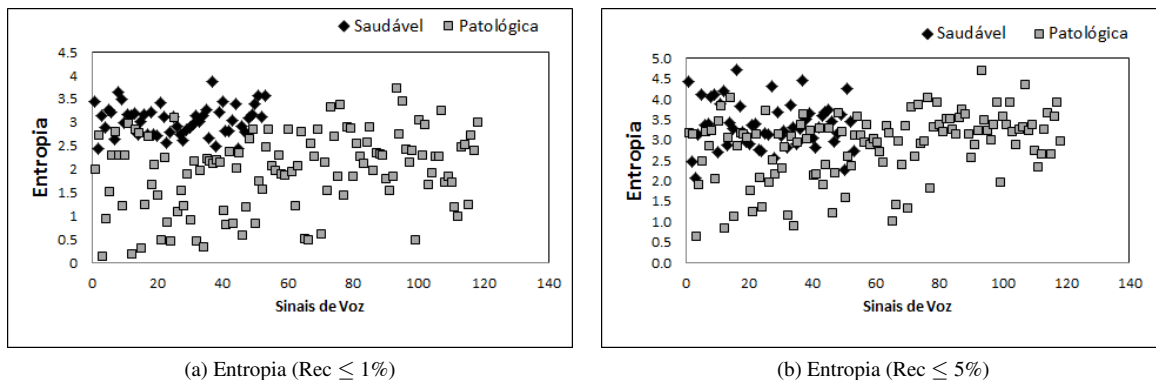


Figura 5: Distribuições dos valores da entropia da distribuição de frequências das linhas diagonais para sinais de vozes saudáveis e patológicas.

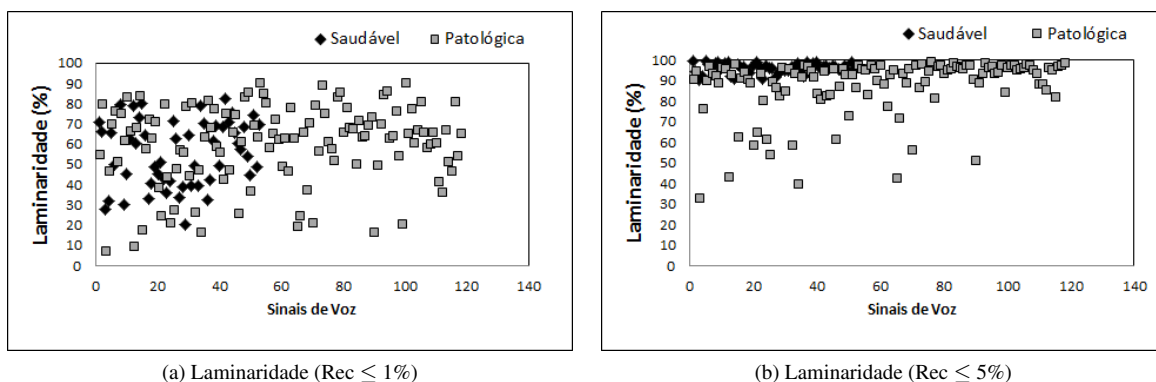


Figura 6: Distribuições dos valores da laminaridade para sinais de vozes saudáveis e patológicas.

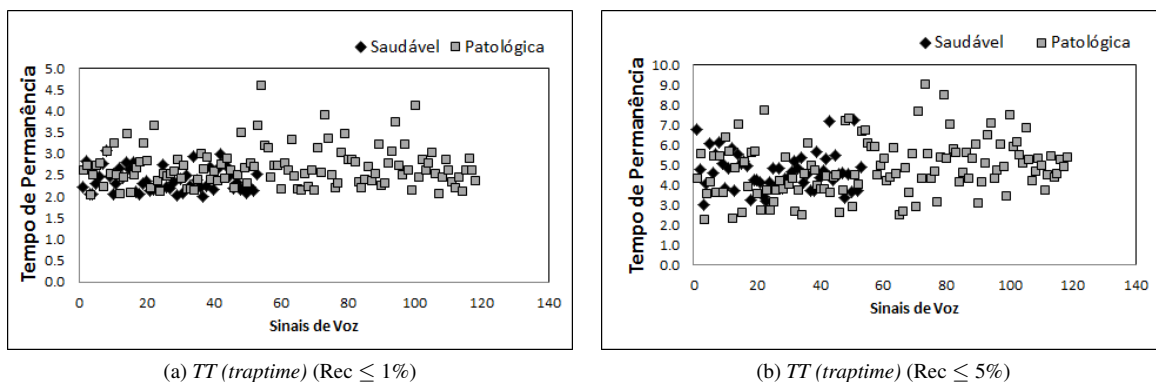


Figura 7: Distribuições dos valores do tempo de permanência em um estado para sinais de vozes saudáveis e patológicas.

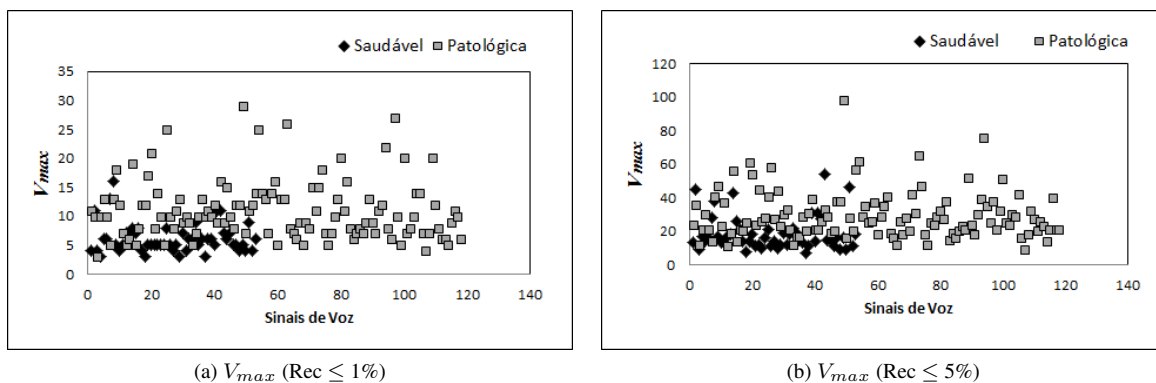


Figura 8: Distribuições dos valores do comprimento máximo das linhas verticais para sinais de vozes saudáveis e patológicas.

Nas Figuras 3–8 o eixo horizontal representa o índice do sinal, enquanto o eixo vertical representa os valores da medida de quantificação de recorrência avaliada.

Como pode ser observado, para uma taxa de recorrência em torno de 5% há uma tendência de saturação das medidas determinismo (Fig. 3b) e laminaridade (Fig. 6b), principalmente para o grupo de sinais de vozes saudáveis. Pode ser notado, ainda, que o aumento da taxa de recorrência parece diminuir o potencial discriminativo da medida de entropia entre os dois grupos de vozes analisados (Fig. 5a e 5b). A análise visual dos demais resultados representados nas Figuras 4, 7 e 8 sugere a não influência dos diferentes valores da taxa de recorrência no poder discriminativo das outras medidas de quantificação.

Nas Tabelas 1 e 2 estão apresentados os valores médios e respectivos desvios padrão para sinais de vozes saudáveis e vozes patológicas, respectivamente, sob diferentes taxas de recorrência.

Tabela 1: Valores médios e desvios padrão das medidas de quantificação de recorrência para sinais de vozes saudáveis sob diferentes taxas de recorrência.

$\%REC(\leq)$	<i>Det (%)</i>	L_{max}	<i>Entr</i>	<i>Lam (%)</i>	V_{max}	<i>TT</i>
1%	88,21 ± 5,68	466,38 ± 211,80	3,04 ± 0,32	55,97 ± 16,42	6,09 ± 2,58	2,38 ± 0,28
2%	92,28 ± 4,24	938,91 ± 369,98	3,23 ± 0,43	81,98 ± 8,25	9,30 ± 4,33	2,98 ± 0,47
3%	93,79 ± 3,72	1320,75 ± 573,03	3,27 ± 0,52	90,50 ± 4,91	12,57 ± 6,64	3,60 ± 0,63
4%	94,69 ± 3,38	1779,02 ± 965,48	3,33 ± 0,58	94,32 ± 3,23	15,47 ± 7,76	4,20 ± 0,79
5%	95,16 ± 3,15	2121,04 ± 1161,18	3,37 ± 0,58	95,89 ± 2,41	18,45 ± 10,39	4,66 ± 0,95

Tabela 2: Valores médios e desvios padrão das medidas de quantificação de recorrência para sinais de vozes patológicas sob diferentes taxas de recorrência.

$\%Rec(\leq)$	<i>Det (%)</i>	L_{max}	<i>Entr</i>	<i>Lam (%)</i>	V_{max}	<i>TT</i>
1%	60,25 ± 25,18	97,52 ± 128,63	1,98 ± 0,81	60,32 ± 19,46	10,98 ± 5,14	2,69 ± 0,46
2%	71,82 ± 23,03	185,96 ± 207,34	2,40 ± 0,83	75,91 ± 17,83	16,36 ± 7,68	3,30 ± 0,74
3%	77,23 ± 21,14	329,15 ± 397,90	2,63 ± 0,82	82,45 ± 16,60	20,76 ± 10,18	3,87 ± 0,95
4%	80,48 ± 19,33	523,81 ± 659,56	2,78 ± 0,81	85,95 ± 14,93	24,87 ± 11,57	4,33 ± 1,11
5%	82,87 ± 18,11	830,64 ± 1049,18	2,90 ± 0,80	88,13 ± 13,99	29,45 ± 14,22	4,86 ± 1,36

Observando as Tabelas 1 e 2 nota-se, em ambos os casos, o aumento nos valores médios de todas as medidas de quantificação investigadas à medida que a taxa de recorrência cresce. Por outro lado, os valores do desvio padrão das medidas determinismo e laminaridade diminuem com o crescimento da taxa de recorrência.

A fim de investigar a possibilidade das medidas de quantificação de recorrência oferecerem um potencial discriminativo entre os grupos de sinais de vozes saudáveis e os sinais de vozes patológicas considerados, foram realizados testes estatísticos utilizando o *software* SPSS [20].

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados da análise estatística realizada visando inferir sobre o potencial de cada uma das medidas de recorrência na discriminação entre os grupos de vozes saudáveis e de vozes patológicas.

Tabela 3: Resultados dos testes estatísticos visando a comparação entre os valores das medidas de quantificação de recorrência para sinais de vozes saudáveis e patológicas sob diferentes taxas de recorrência.

$\%Rec(\leq)$	<i>Det(%)</i>	L_{max}	<i>ENTR</i>	<i>LAM(%)</i>	V_{max}	<i>TT</i>
1%	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,078$	$p < 0,001$	$p < 0,001$
2%	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,213$	$p < 0,001$	$p = 0,006$
3%	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,008$	$p < 0,001$	$p = 0,078$
4%	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,362$
5%	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,002$	$p < 0,001$	$p < 0,001$	$p = 0,274$

Considerando um nível de significância de 5% e uma taxa de recorrência máxima de 1% e 2%, a aplicação do teste não-paramétrico de Mann-Whitney [21] sugere diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de sinais de vozes saudáveis e patológicas para as todas as medidas consideradas, com exceção da medida de laminaridade (*LAM*). Por outro lado, considerando uma taxa de recorrência máxima de 3%, 4% e 5% a aplicação do teste não-paramétrico de Mann-Whitney sugere diferenças estatisticamente significativas entre os grupos de sinais de vozes saudáveis e patológicas para todas as medidas consideradas, com exceção da medida do tempo de permanência (*TT*).

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho é avaliado o potencial discriminativo de medidas de quantificação de recorrência para a caracterização de sinais de vozes saudáveis e vozes afetadas por patologias laringeas. Os resultados obtidos por meio da realização de uma análise estatística baseada em testes de hipótese revelam que, em geral, a utilização da análise de quantificação de recorrência se mostra como uma técnica promissora na tarefa de discriminação entre os dois grupos de sinais considerados. Dessa forma, os resultados encontrados sugerem a viabilidade do uso das medidas de quantificação de recorrência em aplicações que visem a classificação de sinais de vozes saudáveis e vozes patológicas.

REFERÊNCIAS

- [1] J. I. Godino-Llorente, P. Gomes-Vilda and M. Blanco-Velasco. “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.
- [2] J. Jiang, Y. Zhang and C. McGilligan. “Chaos in voice, from modeling to measurement”. *Journal of Voice*, vol. 20 (1), pp. 2–17, January 2006.
- [3] M. Petrovic-Lazic, S. Babac and M. Vukovic. “Acoustic Voice Analysis of Patients With Vocal Fold Polyp”. *Journal of Voice*, vol. 25 (1), pp. 94–97, 2011.
- [4] L. Cummings. *Clinical linguistics*. Edinburgh Univ Pr, 2008.
- [5] J. C. Stemple, L. Glaze and B. Klaben. *Clinical Voice Pathology - Theory and Management*. Plural Publishing, fourth edition, 2010.
- [6] A. Kumar and S. K. Mullick. “Nonlinear dynamical analysis of speech”. *Journal Acoustic Society of America*, vol. 100(1), pp. 615–629, July 1996.
- [7] J. P. Eckmann, S. O. Kamphorst and D. Ruelle. “Recurrence plots of dynamical systems”. *Europhys. Letters*, vol. 4(9), pp. 973–977, 1987.
- [8] N. Marwan. “Encounters With Neighbours - Current Developments of Concepts Based on Recurrence Plots and Their Applications”. Ph.D. thesis, University of Potsdam, 2003.
- [9] C. L. Webber-Jr. and J. P. Zbilut. “Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies”. *J. Appl. Physiol.*, vol. 76, pp. 965–973, 1994.
- [10] N. Marwan. “A historical review of recurrence plots”. *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 164, pp. 3–12, 2008.
- [11] M. A. SAVI. *Dinâmica não-linear e Caos*. E-papers, 2006.
- [12] F. Takens. “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.
- [13] C. L. Webber-Jr. and J. P. Zbilut. “Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems”. In *Tutorials in Contemporary Nonlinear Methods for the Behavioral Sciences*, edited by M. A. Riley and G. C. V. Orden, 2005.
- [14] J. P. Zbilut and C. L. Webber-Jr. “Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots”. *Physics Letters A*, vol. 171 (3-4), pp. 199–203, 1992.
- [15] K. Elemetrics. “Kay Elemetrics Corp. Disordered Voice Database”. Model 4337, 03 Ed., 1994.
- [16] E. Kononov. “Visual Recurrence Analysis 4.9”, March 2006. Software disponível em <http://nonlinear.110mb.com/vra/>.
- [17] A. M. Fraser and H. L. Swinney. “Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information”. *Physical Review A*, vol. 33, pp. 1134–1140, 1986.
- [18] M. B. Kennel, R. Brown and H. D. I. Abarbanel. “Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction”. *Phy*, vol. 45 (6), pp. 3403–3411, 1992.
- [19] C. L. Webber-Jr. “Recurrence Quantification Analysis, v. 13.1”, June 2009. software package disponível em <http://homepages.luc.edu/cwebber/>.
- [20] IBM. “IBM SPSS Statistics, v. 19”, 2010.
- [21] V. T. Motta and P. F. de Oliveira Filho. *SPSS - Análise de Dados Biomédicos*. Medbook, 2009.