

# 1º Congresso Brasileiro de Redes Neurais

Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
Itajubá, 24 a 27 de outubro de 1994

## Soluções Conexionistas para o Reconhecimento de Irregularidades em Espectrogramas

Claudio Loesch

Universidade Regional de Blumenau  
Departamento de Matemática

### Resumo

O trabalho explora a pesquisa de uma solução ao problema da detecção e o reconhecimento de irregularidades em espectrogramas obtidos de regularímetros, através da implementação de uma rede híbrida caracterizada por três fases: detecção de agrupamentos para análise, processamento do mesmo e a posterior classificação do padrão.

### Introdução

A regularidade dos fios têxteis é de grande importância para o aspecto final das malhas e tecidos. Na análise dos fios, o termo *irregularidade* caracteriza as variações de torção, resistência, título, aparência, etc. Estas irregularidades são geradas normalmente por órgãos defeituosos de alguma das diversas máquinas do processo produtivo, ou por regulagens defeituosas. O regularímetro serve área de manutenção mecânica, para a identificação e correção dos possíveis defeitos junto s máquinas quando

detectadas irregularidades no processo produtivo da fiação.

O regularímetro apresenta, após uma análise, dois tipos de gráficos: o *diagrama de variação de massa* e o *espectrograma*. Enquanto que o primeiro registra a variação de massa do material de prova (mecha, fio ou pavio), submetido a teste, o correspondente espectrograma tem como domínio o comprimento de onda da irregularidade, discretizado em um certo número de canais, e como imagens as correspondentes amplitudes das irregularidades presentes, em cada canal. É resultante da análise harmônica do diagrama de variação de massa. Para poder abranger uma ampla faixa de comprimentos de onda dentro do domínio, usam-se comprimentos de onda por canal que crescem em escala geométrica. Nos regularímetros USTER-III os comprimentos de onda crescem na razão  $\sqrt[3]{2}$ . Assim, estes conseguem abranger comprimentos de onda de 1 cm a 40 m com 61 canais, que é a faixa normal que cobre a maioria dos testes. Desta forma, aplica-se a escala logarítmica ao eixo das abcissas.

As fibras, componentes do material fibroso em processo, são elementos finitos aleatoriamente distribuídos. A disposição real das fibras assim obriga existência de irregularidades periódicas mesmo sob condições perfeitas de funcionamento de máquinas no processo de montagem das fibras. O espectrograma normal resulta de montagens de fibras

que podem ser realizadas tecnicamente e que são livres de falhas. Assim, o material produto de cada etapa do processo produtivo possui um espectrograma normal característico, cuja forma depende ainda da máquina de onde provém. As irregularidades provocadas por defeitos mecânicos adicionam-se às irregularidades normais, e detectar a presença das primeiras é o objetivo da análise.

A constatação de uma irregularidade é simples quando se apresenta como um pico de irregularidade singular, como na figura 1. O espectrograma evidencia que o excesso da amplitude registrada em  $\lambda_0$  sobre a curva aceita como normal, que, pela sua singularidade, é causado pela ocorrência de uma irregularidade senoidal de comprimento de onda  $\lambda_0$ .

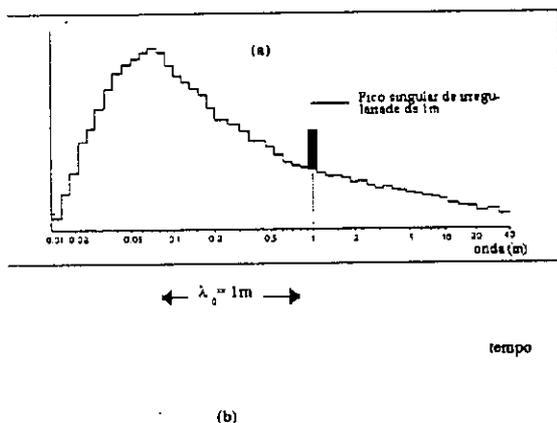


Figura 1. (a) Um espectrograma exibindo um único pico de irregularidade periódica, em um comprimento de onda  $\lambda_0$ . (b) Variação de tensão provocada pelo órgão defeituoso, produzindo falha periódica senoidal.

A interpretação dos diagramas torna-se mais difícil quando pretende-se descobrir variações periódicas múltiplas, que além disso, vão se sobrepondo. Ondas periódicas não-senoidais podem ocorrer. Variações assimétricas de tensão no fio, provocadas por movimento reverso na bobina do filatório podem provocar falhas periódicas como uma onda dente-

de-serra (figura 2-b). O desenvolvimento desta onda, em série de Fourier, é constituído de infinitos termos de magnitudes decrescentes. A magnitude da onda fundamental, e de alguns de seus primeiros harmônicos podem ser percebidos sem muita dificuldade, como proporcionais aos excessos dos picos sobre o espectrograma normal (figura 2-a).

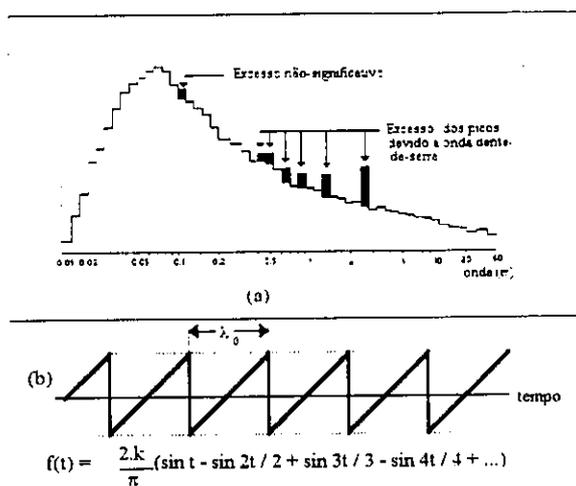


Figura 2. (a) Picos de irregularidade acima do espectrograma normal perfeitamente visíveis, todos provocados por (b) uma onda dente-de-serra de tensão assimétrica.

Dada a razão  $\sqrt[3]{2}$ , é fácil constatar que, se o canal  $n$  contém a amplitude da irregularidade da onda da irregularidade fundamental  $\lambda_0$ , então seus primeiros harmônicos de comprimento de onda  $\lambda_0/2$ ,  $\lambda_0/3$ ,  $\lambda_0/4$  e  $\lambda_0/5$  contém suas amplitudes, respectivamente, nos canais  $n-5$ ,  $n-8$ ,  $n-10$ , e  $n-11,6$ . Neste último caso, distribuído entre  $n-11$  e  $n-12$ .

Um pico, ao invés de possuir toda sua amplitude de irregularidade da onda concentrada no mesmo canal, pode apresentar parte distribuída para um canal vizinho. A interpretação deve levar em conta um pico único de amplitude correspondente sua soma (figura 3).

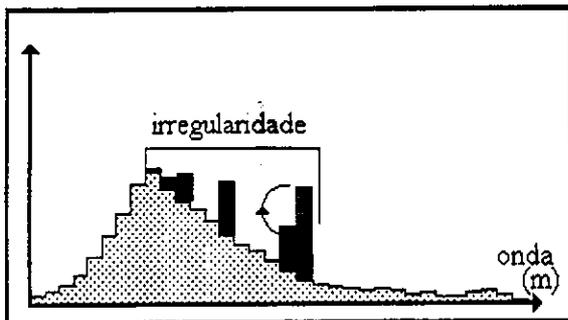


Figura 3. Em preto, a irregularidade constatada. A área sombreada indica a amplitude mais adequada ao reconhecimento, pelo deslocamento do pico do canal à esquerda.

O primeiro passo ao reconhecimento de irregularidades consiste em extrair o espectrograma normal do espectrograma em análise. O resultado, um vetor de excessos sobre o espectrograma normal, é o objeto da análise. Neste, sobram: ruídos, valores não-significativos e evidências fortes de irregularidades, e este vetor será a entrada para a análise da rede.

### Filtragem de Ruídos e Detecção de Agrupamentos

A segmentação da imagem, com filtragem de ruídos e detecção de agrupamentos, pode ser executada por uma rede neural cuja arquitetura consiste numa ou mais camadas dispostas sequencialmente, cada camada lateralmente conectada.

Será discutida agora a dinâmica da camada. Pelas conexões laterais, as saídas dos elementos de processamento realimentam suas próprias entradas e as entradas dos demais elementos. Nesta camada, os elementos de processamento cooperam e disputam entre si os sinais de entrada, de acordo com o sinal algébrico dos pesos das conexões, iterativamente, até alcançarem um possível estado de estabilidade. As equações do processo iterativo para cada elemento  $j$  da camada cooperativa/competitiva, na transição para a iteração  $(k+1)$  são:

$$s_j^{(k+1)} = \frac{\sum_i x_i^{(k)} \cdot w_{ij}}{\sum_i x_i^{(k)}} + b_j \quad (1)$$

$$x_j^{(k+1)} = F(s_j^{(k+1)}) \quad (2)$$

onde:

$x_i^{(k)}$  é o valor do sinal do  $i$ -ésimo elemento de processamento;

$w_{ij}$  é o peso da conexão da saída do elemento  $i$  para a entrada do elemento  $j$ ;

$s_j^{(k+1)}$  é o sinal integrado do elemento  $j$ ;

$b_j$  é um escalar;

$F$  é a função de transferência.

Para precaver contra crescimentos de magnitudes de sinais de forma desordenada e não-limitada, escolhem-se para  $F$  funções que prendem os limites superiores e inferiores de seus argumentos. Uma solução simples consiste em adotar

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < 0 \\ 1 & \text{se } x > 1 \\ x & \text{se } 0 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

Escolhendo adequadamente os pesos das conexões, a convergência de (3) fica assegurada. Devem-se escolher pesos que refletem característica de distribuição espacial e características comuns a todos os padrões possíveis de serem classificados. Se os padrões são conexos no domínio, escolhem-se pesos positivos para as conexões de cada elemento com seu espacialmente vizinho e, eventualmente, para os próximos vizinhos. No entanto, pesos negativos, de efeito inibitório, devem encontrar-se presentes em  $W$ , para que exista efeito competitivo, pois caso contrário, o agrupamento seria global.

Desta forma, valores maiores tendem se fortalecer ainda mais, e inibir outros

eventuais agrupamentos sendo formados. De acordo com a força inibitória, mais de um agrupamento pode sobreviver na estabilização, ou pode sobreviver um único agrupamento. Em qualquer circunstância, a convergência deverá ocorrer para um vetor valores binários 1/0. Elementos que estabilizam com unidades formarão agrupamentos para análise. Após a convergência, processa-se o produto entre os elementos do vetor de entrada e seus correspondentes elementos no vetor de saída. O resultado deverá ser um vetor contendo um único padrão de irregularidade isolado. A maioria dos ruídos fracos terão também sido eliminados pelo processo competitivo. A escolha de valores  $b_j$  negativos fará com que, na ausência de valores de entrada significativos, nenhum sobreviva.

Para o problema de reconhecimento em questão, foi utilizado o conjunto de pesos calculados por (4). Estes valores diminuem, de acordo com o aumento da distância, passando ao efeito competitivo quando  $|i - j| \geq 6$ .

$$w_{ij} = 3.5(e^{-0.2|i-j|} - 0.25), \quad b_j = -0.05 \quad (4)$$

Pode ocorrer, no entanto, que alguns valores não-pertinentes à irregularidade façam também parte do agrupamento. Caso ocorra sobreposição de dois ou mais padrões, ligeiramente defasados em localização, agrupamentos mais largos abrangendo sua união serão criadas. No caso de ausência de qualquer irregularidade de intensidade significativa, acima do espectrograma normal, nenhum agrupamento sobrevive.

Incluiu-se uma nova camada mais competitiva, que recebe os dados que passam pela janela de tamanho  $N$  criada pela etapa anterior. Nesta, utilizou-se

pesos de acordo com (5), para uma filtragem mais restritiva.

$$w_{ij} = \begin{cases} 2.2 & \text{se } i = j \\ -1.15/N & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

Sobrevivem os sinais mais fortes das ondas de estiragem (em torno de 8), e nos casos de ondas com harmônicos, até 5 ou 6 picos pertinentes mais fortes, suficientes para bem caracterizar a onda. Os sinais fora do grupo de canais significativos, que contém apenas ruídos, desaparecem. No caso de pico único, eventualmente podem passar uns poucos outros canais (constatado 2 a 3, em média) além deste. Desta maneira, é possível selecionar um agrupamento de forma mais adequada ao tratamento posterior.

### **Redes de Propagação para Frente e Aprendizado Backpropagation**

As redes de propagação para frente, com múltiplas camadas, e pesos de conexões ajustáveis, comumente aprendizagem via Backpropagation, tem sido apontadas pela literatura como um potente instrumento para classificação de padrões. A prática tem demonstrado poucos resultados animadores em relação ao treinamento simultâneo de todas estas características, utilizando Backpropagation somente. Como alternativa, redes híbridas acenam com possibilidades de utilizar diversos paradigmas combinados, desta forma podendo ser conseguida uma performance melhorada. Isto é conseguido incluindo ou alterando características de topologia, dinâmica e/ou aprendizagem na rede.

Pao sugere a introdução de redes com "functional link", como uma forma alternativa equivalente ao trabalho desempenhado pelas camadas ocultas da rede: o de abstrair características de pa-

drões. A mais competente razão para a escolha deste modelo é a do conhecimento a priori de certas transformações funcionais em que os dados irão expor suas características salientes, o que pode reduzir a rede pela eliminação da camada oculta. A técnica consiste em efetuar um pré-processamento nos dados de entrada, para então aplicar os dados transformados à rede. Como desvantagem, aponta-se para o fato de que não é claro o modo de identificar as funções "functional link" adequadas a um problema específico.

Spirkovska e Reid aperfeiçoaram uma arquitetura de redes neurais de ordem mais elevada, as redes pi-sigma (ou redes HONNs) cujo pré-processamento consiste de todas as somas de produtos de elementos distintos da camada de entrada. Trata-se de uma rede de ligações funcionais especificamente projetada para problemas de reconhecimento de padrões bidimensionais, independente de escala, rotação e translação. Restringindo a ordem dos produtos ao máximo de três, obtiveram sucesso em classificar padrões binários com 100% de acerto, em quadros de pixels binários de dimensão até 128X128.

Embora o vetor de entrada do problema presente seja unidimensional, com valores reais, seria teoricamente possível tentar considerar o reconhecimento do gráfico da irregularidade, desde que se discretize a escala vertical. Porém, para boa confiabilidade, a discretização deve ser ampla o suficiente para discernir entre diferentes possíveis padrões e diferentes amplitudes de irregularidades com os quais os padrões podem ocorrer. Ocorre que a complexidade computacional depende do número de possíveis combinações 3 a 3, muito sujeito à explosão combinatória. Em virtude da acuraci-

dade necessária às amplitudes das irregularidades, a possibilidade de uso desta idéia não foi testada.

### Processamento do Agrupamento Seleccionado

Admita-se que o agrupamento resultante das duas camadas cooperativas/competitivas tenha tamanho  $n$ . A próxima etapa é tratar do problema de invariância a mudanças de escala e a translações da irregularidade contida no espectrograma. Ambos podem ser conseguidos através de processamento intermediário.

A invariância à mudança de escala pode ser efetivada, calculando-se o vetor  $x$  a partir da normalização do vetor  $y$  do agrupamento criado pela segunda camada cooperativa/competitiva.

$$x = y / \|y\| \quad (6)$$

A transformada de Fourier preserva as propriedades fundamentais dos dados, o que a torna unívocamente definida. Além disso, ela pode ser discretizada, o que torna viável seu uso computacional. Dado um vetor  $x = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ , sua transformada de Fourier discreta resulta num vetor complexo  $X$ , cujas componentes podem ser calculadas por (7), ou por métodos mais eficientes, como a transformada rápida de Fourier.

$$X_i = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi nk/N}; \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (7)$$

A sua propriedade mais importante, refere-se ao deslocamento. Para uma translação inteira  $h$ , o vetor  $X'$  de componentes  $x'_k = x_{k-h}$  tem por transformada

$$X'_n = X_n \cdot e^{-j2\pi nh/N} \quad (8)$$

Desta forma,  $|X'_i| = |X_i|$ , para todo  $i$ , e a amplitude da transformada é invariante à translação, o que assegura a invariância à translação. Estes dois processamentos intermediários conferem à rede de propagação para frente uma característica "functional link".

### Classificação do Padrão

No problema de classificação, é importante sabermos qual padrão de irregularidade que foi detectado, e também o respectivo comprimento de onda. Podemos visualizar duas soluções ao problema de classificação. Na primeira solução, implementamos as duas camadas cooperativas/competitivas como descrito. Posteriormente, é feita a classificação do vetor de dados normalizados do agrupamento sobrevivente, em uma rede de alimentação para frente. Neste caso, sem necessidade de nenhuma transformada de Fourier intermediária, pois apenas o agrupamento sobrevivente é enfocado, dentro do qual não haveria nenhum problema de translação. O padrão classificado com sucesso, mais a localização do agrupamento deveriam permitir a localização da onda fundamental, ou, se for uma onda de estiragem, seu ponto de centro.

A segunda solução consiste também nas duas camadas cooperativas/competitivas e normalização do vetor do agrupamento vencedor de saída, mas seguida por uma transformação de Fourier discreta sobre o vetor de domínio do espectro, contendo o agrupamento sobrevivente e demais valores nulos. Posteriormente, é feita a classificação numa rede de alimentação para frente, treinada para reconhecer as transformadas dos possíveis padrões normalizados. A localização do pico da onda fundamental, necessário para auxiliar na pesquisa do órgão defeituoso,

pode se obtida a partir de (8). Se a  $i$ -ésima componente de  $X$  e de  $X'$  possuem ângulos de fase  $\varphi_{X_i}$  e  $\varphi_{X'_i}$ , respectivamente, então

$$h = (\varphi_{X_i} - \varphi_{X'_i})N / (2\pi i) \quad (9)$$

permite obter  $h$  a partir de qualquer valor de  $i$ . Porém, supondo que  $X'$  seja a transformada de Fourier do padrão  $x'$  normalizado e correto, dentro do vetor de tamanho  $n$ , e que  $X$  seja a transformada a ser classificada pela rede, contendo a irregularidade correspondente ao mesmo padrão, o cálculo da mão-direita de (9) poderá fornecer resultados diferentes para diferentes valores de  $n$ , em virtude de ruídos e imprecisões diversas. A prática demonstrou que a média destes valores não é um bom estimador para  $h$ , pois para alguns poucos valores de  $i$ , os ângulos de fase  $\varphi_{X_n}$  e  $\varphi_{X'_n}$  podem diferir significativamente. Não obstante, a mediana tem demonstrado bons resultados.

### Conclusão

Qual solução adotar? A primeira solução, mais simples, evita a necessidade de computar a transformada de Fourier e opera com uma rede posterior de propagação para frente mais simples. Isto reduz sensivelmente tempo e esforços computacionais. Porém, o entrave consiste no fato de que não há garantia sobre o tamanho da janela proveniente das camadas cooperativas/competitivas. Embora isto não comprometa a posterior classificação do padrão, o problema é a impossibilidade de conseguir, por este meio, assegurar a exata localização da onda fundamental dentro do espectrograma. Esta localização é fundamental para determinar o comprimento de onda, e posteriormente localizar a causa.