



MONITORAÇÃO DE DEFEITOS EM DUTOS RÍGIDOS POR EMISSÃO ACÚSTICA
E REDES NEURAIS

Carlos Fernando Carlim Pinto

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Luiz Pereira Calôba

Romeu Ricardo da Silva

Rio de Janeiro

Março de 2011

MONITORAÇÃO DE DEFEITOS EM DUTOS RÍGIDOS POR EMISSÃO ACÚSTICA
E REDES NEURAIS

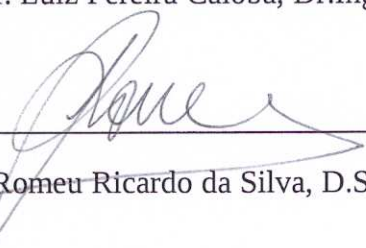
Carlos Fernando Carlim Pinto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:



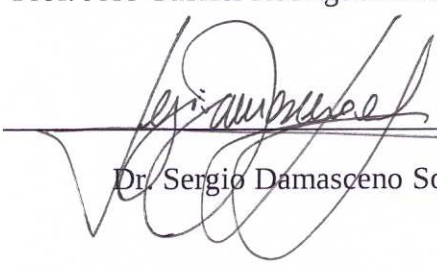
Prof. Luiz Pereira Calôba, Dr.Ing.



Dr. Romeu Ricardo da Silva, D.Sc.



Prof. José Gabriel Rodriguez Carneiro Gomes, Ph.D



Dr. Sergio Damasceno Soares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2011

Pinto, Carlos Fernando Carlim

Monitoração de Defeitos em Dutos Rígidos por Emissão Acústica e Redes Neurias/Carlos Fernando Carlim Pinto. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XII, 93 p.: il.: 29,7cm.

Orientadores: Luiz Pereira Calôba

Romeu Ricardo da Silva.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 65-66.

1. Reconhecimento de Padrões. 2. Emissão Acústica.

I. Calôba, Luiz Pereira, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica.

III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que nos momentos difíceis sempre me deu forças para continuar.

Ao meu orientador, professor Luiz Pereira Calôba, que acreditou no meu potencial e foi fundamental nesta conquista.

Ao meu segundo orientador, Romeu Ricardo da Silva, agradeço pelas inúmeras vezes que me ajudou para discutir os resultados e o caminho a ser seguido.

Agradeço a CAPES pela bolsa concedida para a realização do mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MONITORAÇÃO DE DEFEITOS EM DUTOS RÍGIDOS POR EMISSÃO ACÚSTICA E REDES NEURAIIS

Carlos Fernando Carlim Pinto

Março/2011

Orientadores: Luiz Pereira Calôba

Romeu Ricardo da Silva

Programa: Engenharia Elétrica

Dentre os ensaios não destrutivos, destaca-se o método de inspeção com a técnica de emissão acústica, o qual está baseado na detecção de fontes de sinais acústicos que são emitidos durante a propagação de descontinuidades e deformações plásticas acentuadas. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver classificadores não lineares, tendo como entrada os parâmetros dos sinais de Emissão Acústica (EA), capazes de discriminar o crescimento dos defeitos de fratura em duto rígido em três classes de sinais: Sem Propagação, Propagação Estável e Propagação Instável. A discriminação entre as classes foi feita por classificadores de padrões não-lineares usando redes neurais artificiais *feedforwards* treinadas pelo algoritmo *backpropagation*. Os resultados apresentaram acurácia de classificação de 86% para situação de três classes de sinais, provando que houve uma evolução significativa nos estudos com o intuito de separar o momento de propagação estável do instável. Realizou-se também estudo de relevância de parâmetros dos sinais de EA.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MONITORING OF DEFECTS OF RIGID PIPES BY ACOUSTIC EMISSION AND
NEURAL NETWORKS

Carlos Fernando Carlim Pinto

March/2011

Advisors: Luiz Pereira Calôba
Romeu Ricardo da Silva

Department: Electrical Engineering

Among the non-destructive testing, there is the method of inspection with the acoustic emission technique, which is based on the detection of sources of acoustic signals that are emitted during the propagation of discontinuities and sharp plastic deformations. The present work aims to develop non-linear classifiers, taking as input the parameters of the signs of Acoustic Emission (AE) capable of discriminating the growth defects of fracture in rigid duct into three classes of signs: No Propagation, Stable Propagation and Unstable Propagation. Discrimination between classes was made by classifiers nonlinear patterns using artificial neural networks trained by back propagation algorithm feed forwards. The results showed classification accuracy of 86% to situation of three classes of signals, proving that there was a significant evolution in the studies with the aim of separating the time of stable propagation of the unstable. There were also relevant study parameters of AE signals.

ÍNDICE DE TEXTO

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | REVISÃO TEÓRICA SOBRE EMISSÃO ACÚSTICA | 3 |
| 2.1 | Princípios e Teoria | 3 |
| 2.2 | Propagação do Sinal | 4 |
| 2.3 | Tipos de Sinais..... | 5 |
| 2.4 | Processamento dos Sinais | 6 |
| 2.5 | Parâmetros de EA | 7 |
| 3 | METODOLOGIA DE PESQUISA | 10 |
| 3.1 | AQUISIÇÃO DOS SINAIS..... | 10 |
| 3.1.1 | Materiais..... | 10 |
| 3.1.2 | Ensaio de Aquisição de Sinais de Emissão Acústica..... | 11 |
| 3.1.3 | Definição das Classes..... | 13 |
| 3.1.4 | Pré-processamento dos Dados..... | 14 |
| 3.2 | Desenvolvimento dos Classificadores..... | 14 |
| 3.2.1 | Classificação Probabilística..... | 15 |
| 3.3 | Critério de Relevância | 18 |
| 3.4 | Acurácia dos Classificadores | 20 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 21 |
| 4.1 | Ensaio 1 | 21 |
| 4.1.1 | Definição dos parâmetros de treinamento | 21 |
| 4.1.2 | Classificação sem Duplicação de Dados | 23 |
| 4.1.3 | Classificação com Duplicação de Dados | 24 |
| 4.1.4 | Classificação com Duas Classes | 28 |
| 4.1.5 | Classificação com Novo Critério de Separação das Classes..... | 35 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.2 | Ensaio 2 | 41 |
| 4.2.1 | Separação em Duas Classes | 43 |
| 4.2.2 | Separação com Três classes | 45 |
| 4.3 | Ensaio 3 | 49 |
| 4.3.1 | Separação em Duas Classes | 49 |
| 4.3.2 | Separação com Três classes | 51 |
| 4.4 | Estudo da Relevância das Entradas | 55 |
| 5 | CONCLUSÕES | 61 |
| 6 | TRABALHOS FUTUROS | 63 |
| 7 | PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS | 64 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 65 |
| | APÊNDICE | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Características da emissão acústica [7]..... | 5 |
| Figura 2 - À esquerda um sinal transiente e à direita um sinal contínuo de EA [5] | 6 |
| Figura 3 - Determinação do tempo de chegada [5]..... | 7 |
| Figura 4 - Parâmetros de um sinal transiente [5] | 8 |
| Figura 5 – Esquema de posicionamento dos sensores na superfície do corpo de prova... | 10 |
| Figura 6 - Distribuição normal das saídas U de duas classes hipotéticas 1 e 2 mostrando a probabilidade de classificação correta, e de haver confusão de classificação entre estas duas classes (soma das áreas hachuradas dividida pela área total que é 2).[2]..... | 16 |
| Figura 7 - (a) cálculo da diferença entre o U_a e U_b para quando há mais de um U positivo. (b) cálculo da diferença entre o U_a e U_b para quando todas as saídas U são negativas. [2]..... | 17 |
| Figura 8 - Distribuição normal que permite calcular a probabilidade de ocorrer classificação correta usando o critério de reclassificação.[2] | 18 |
| Figura 9 - Gráfico Pressão e ToFD por Tempo | 21 |
| Figura 10 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos conjuntos sorteados para classificação | 27 |
| Figura 11 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos conjuntos .. | 27 |
| Figura 12 – Distribuição dos valores de Z3 para a classe PI em relação aos conjuntos sorteados para a classificação. | 28 |
| Figura 13 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos conjuntos sorteados para classificação. | 29 |
| Figura 14 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos conjuntos sorteados para classificação. | 29 |
| Figura 15 - Divisão dos novos conjuntos de treinamento e teste..... | 31 |
| Figura 16 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos conjuntos sorteados para classificação | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 17 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos conjuntos sorteados para classificação. | 33 |
| Figura 18 - (a) - $U_{\text{médio}} = U1_{\text{médio}} - U2_{\text{médio}}$; (b) Apenas saída SP : $U = U1 - U2$; (c) Apenas PE: $U = U2 - U1$ | 35 |
| Figura 19 - Separação das classes para Rede A..... | 36 |
| Figura 20 - Separação das classes para Rede B..... | 37 |
| Figura 21 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos intervalos definidos..... | 39 |
| Figura 22 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos intervalos definidos..... | 39 |
| Figura 23 – Distribuição dos valores de Z3 para a classe PI em relação aos intervalos definidos..... | 40 |
| Figura 24 - Gráfico Pressão e TOFD por Tempo - Ensaio 2..... | 41 |
| Figura 25 - Pressão e ToFD por Pressão..... | 43 |
| Figura 26 - Pressão e ToFD por Tempo - separação em 2 classes..... | 49 |
| Figura 27 - Pressão e ToFD por Tempo - separação em 3 classes..... | 52 |
| Figura 28 - Gráfico da relevância de cada parâmetro para cada uma das três classes..... | 56 |
| Figura 29 - Em cinza o histograma das relevâncias para as três classes juntas. As estrelas indicam a relevância de cada parâmetro para as três classes juntas. | 57 |
| Figura 30 - Separação de conjuntos pela relevância. À direita o percentual de acerto na classificação de cada conjunto. | 58 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Fatores de Influencia [6]..... | 9 |
| Tabela 2 - Parâmetros de Emissão Acústica coletados..... | 12 |
| Tabela 3 - Índice de acerto em função da variação do número de neurônios na camada intermediária da rede..... | 22 |
| Tabela 4 - Índices de acerto em função da variação do número de neurônios na camada intermediária da rede, com taxa de aprendizado (α) máximo igual a 0,2. | 23 |
| Tabela 5 - Estimação da acurácia de classificação para os 10 pares de conjuntos sorteados | 24 |
| Tabela 6 - tabela confusão dos conjuntos de treino e teste com duplicação de dados..... | 26 |
| Tabela 7 - Definição da separação entre as classes para o treinamento da rede A | 36 |
| Tabela 8 - Definição da separação entre as classes para o treinamento da rede B | 37 |
| Tabela 9 - Tabela confusão para dados de treinamento da rede A | 38 |
| Tabela 10 - Tabela confusão para dados de treinamento da rede B..... | 38 |
| Tabela 11 - Índice de acerto em função da variação do número de neurônios na camada intermediária da rede treinada para classificar três classes..... | 42 |
| Tabela 12 - Resultado da média de acerto para os 10 conjuntos de treino e teste (duas classes)..... | 44 |
| Tabela 13 – Resultados do desvio padrão da média de acerto para os 10 conjuntos de treino e teste (duas classes). STD – Desvio padrão da média geral de acerto. | 44 |
| Tabela 14 - Tabela de Confusão média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação) | 46 |
| Tabela 15 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado. STD – Desvio padrão da média geral de acerto. | 46 |
| Tabela 16 - Tabela de Confusão da média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes com reclassificação)..... | 47 |

| | |
|--|----|
| Tabela 17 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes com reclassificação). STD – Desvio padrão da média geral de acerto. | 48 |
| Tabela 18 - Tabela de Confusão da média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (duas classes com reclassificação). | 50 |
| Tabela 19 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (duas classes com reclassificação). | 51 |
| Tabela 20 – Tabela de Confusão média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado. | 53 |
| Tabela 21 – Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado. STD – Desvio padrão da média geral de acerto. | 53 |
| Tabela 22 - Tabela de Confusão média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes com reclassificação). NC – não classificado. | 54 |
| Tabela 23 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado. STD – Desvio padrão da média geral de acerto. | 54 |
| Tabela 24 - Tabela confusão da rede treinada com todos os 19 parâmetros de entrada. | 59 |
| Tabela 25 - Tabela confusão da rede treinada com os 7 parâmetros mais relevantes(C-Freq, ASL, AMP, I-Freq,Freq-PP1, Freq-PP2, Freq-PP3). | 60 |

1 Introdução

Em medicina, um exame não-invasivo é definido como procedimento que não rompe a pele ou penetra fisicamente no corpo e é de grande importância no diagnóstico de um paciente. Dentre os diversos tipos de exames, destacam-se o ultrassom, a tomografia computadorizada e a ressonância magnética. Análogo a medicina, na indústria existem os ensaios não-destrutivos (END), só que aplicados a materiais e equipamentos. Estes ensaios constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade, contribuindo para reduzir os custos, garantir a qualidade e aumentar a confiabilidade operacional dos equipamentos. Destaca-se que os métodos de END são largamente utilizados nos setores petrolífero, químico, aeronáutico, siderúrgico, naval, eletromecânico, entre outros.

Dentre os ensaios não destrutivos, destaca-se o método de inspeção por Emissão Acústica que está baseado na detecção de sinais acústicos que são emitidos durante a propagação de descontinuidades e deformações plásticas acentuadas. Contudo, este método não é capaz de fornecer as dimensões dos defeitos, uma vez que só fornece indicações de descontinuidades ativas durante o carregamento das estruturas. Sua principal aplicação é a monitoração em tempo real de equipamentos, sendo o dimensionamento realizado por outros métodos de ensaios não destrutivos como, por exemplo, o ultrassom.

As técnicas de reconhecimento de padrões e modelagem de sinais associadas a ensaios não destrutivos vêm se mostrando como ferramentas poderosas no desenvolvimento de sistemas automáticos ou semi-automáticos de inspeção de equipamentos [1,2,3].

Motivado pela importância da Emissão Acústica na inspeção de equipamentos e diante da potencialidade de se implementar classificadores não lineares pelas técnicas de rede neurais, o presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver classificadores de padrões, a partir dos parâmetros dos sinais de Emissão Acústica (EA) capazes de discriminar o crescimento dos defeitos de fratura em duto rígido em três classes de sinais:

Sem Propagação (SP), Propagação Estável (PE) e Propagação Instável (PI). Os sinais de EA foram adquiridos em ensaios hidrostáticos de tubos contendo trincas superficiais monitoradas pela técnica ToFD (*Time of Flight Diffraction*) de ensaio ultrassônico.

Ressalta-se que os sinais utilizados neste trabalho são provenientes dos ensaios realizados em um projeto de P&D entre o TMEC/CENPES/PETROBRAS e o Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS, e estão também inseridos no projeto intitulado Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas de Reconhecimento de Padrões para Detectar a Propagação de Defeitos em Dutos Rígidos Inspeccionados por Emissão Acústica desenvolvido entre a PETROBRAS/CENPES/TMEC e a UFRJ/COPPE/LPS.

2 Revisão Teórica sobre Emissão Acústica

2.1 Princípios e Teoria

Em 1950, Joseph Kaiser publicou em sua tese de PhD o primeiro estudo abrangente sobre o tema, onde descobriu que materiais emitem pulsos acústicos quando colocados sob estresse. E uma vez que o corpo de prova tenha sido carregado e a emissão acústica tenha cessado, nenhuma nova emissão ocorrerá até que o nível de carregamento anterior tenha sido ultrapassado. Estas descobertas ficaram conhecidas como Efeito Kaiser e estes princípios são usados até os dias de hoje na teoria de emissão acústica.

A emissão acústica (EA) é o único método de ensaio não destrutivo (END), onde o material inspecionado gera o próprio sinal ao apresentar falha [3]. Como já mencionado, este método é baseado no fato do material sólido emitir sinais de ultrassom durante estresse térmico ou mecânico nos pontos onde ocorrerem às deformações, permitindo identificar e mostrar a falha no momento em que ela é criada. Por este motivo, falhas não podem ser retestadas por EA: nestes casos se aplicam os métodos ultrassônicos, os quais detectam e caracterizam a falha após ela ser criada [5].

O ensaio de EA é caracterizado por ser um método para detecção e monitoração da resposta de um material à variação da carga aplicada e geralmente requer que uma tensão maior que a máxima tensão atingida durante a operação seja aplicada, especialmente no caso de equipamentos construídos de materiais metálicos. A monitoração pode ser feita a partir de fontes remotas e em alguns casos à distância de vários metros e realizada em tempo real do desenvolvimento das descontinuidades, detectando e localizando o crescimento de dano. Por ser não intrusivo é aplicável para todas as estruturas, enterradas ou não, moldadas, revestidas ou não, prevenindo possíveis falhas repentinas no equipamento de pressão. [6]

Um exemplo de fonte de EA é a corrosão de metais em fundos de tanques de armazenamento de óleo, onde a emissão acústica da falha se propaga através do líquido até a parede do tanque, onde pode ser detectada. Com vazamento a EA é produzida, por exemplo, pelo próprio fluxo turbulento do líquido ou pelas partículas que retornam do suporte do tanque, neste caso o sinal de falha de emissão acústica ocorre principalmente em altas pressões. As baixas diferenças de pressões causam principalmente fluxo laminar que emite sinais de EA contínuo com baixa amplitude e pouca distância de propagação, sendo considerado ruído. [5]

2.2 Propagação do Sinal

Análogo ao epicentro de um terremoto, mas com dimensões microscópicas. Um evento de EA é resultado do deslocamento pontual muito rápido do material. Este deslocamento é a fonte de uma onda elástica, a qual se propaga em todas as direções.

As ondas são detectadas por transdutores que convertem os movimentos da superfície do material em sinais elétricos. Estes sinais são processados para indicar e localizar as fontes de emissão acústica [7]. A Figura 1 detalha o princípio da EA.

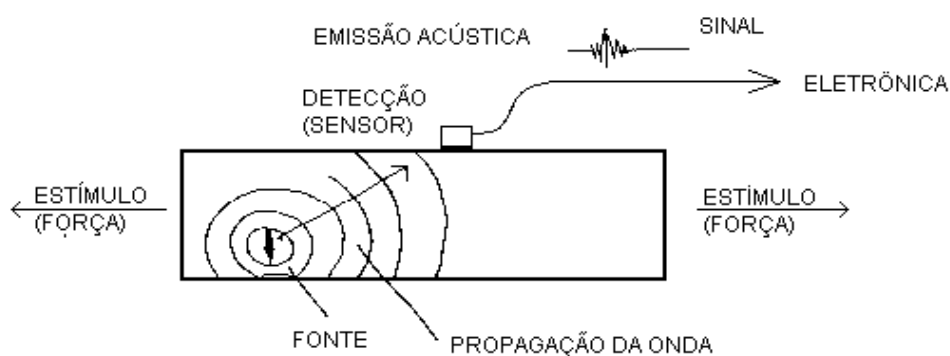


Figura 1 - Características da emissão acústica [7]

O cálculo da localização da fonte emissora de EA pode ser realizado pela diferença de tempo de chegada das diferentes ondas em diferentes sensores, pois dependendo da posição da fonte emissora, a onda atinge o sensor com certo atraso. Atualmente o cálculo de localização pode ser feito em tempo real, ou seja, durante a inspeção, e o resultado pode ser mostrado imediatamente [5].

Existem 3 fatores fundamentais para a determinação do local da fratura, são eles: atenuação do sinal, que define a distancia necessária entre os sensores para a detecção confiável; velocidade de propagação, parâmetro fundamental para a determinação precisa da fonte emissora de EA; e tipos de ondas acústicas, os quais determinam o contorno da onda no entorno do sensor [7].

2.3 Tipos de Sinais

Existem dois tipos de emissão acústica: Emissão de Fratura e Emissão Contínua.

(a) Emissão de fratura: também conhecida como emissão transiente, é caracterizada por eventos discretos que podem ser separados um do outro, isto é, os pontos iniciais e finais diferem claramente do ruído de fundo.

(b) Emissão contínua: caracterizado por eventos que não podem ser separados um do outro, isto é, não há um ponto final para o sinal, pode-se apenas visualizar a amplitude e a variação de frequência.

A Figura 2 ilustra os dois tipos de emissão.

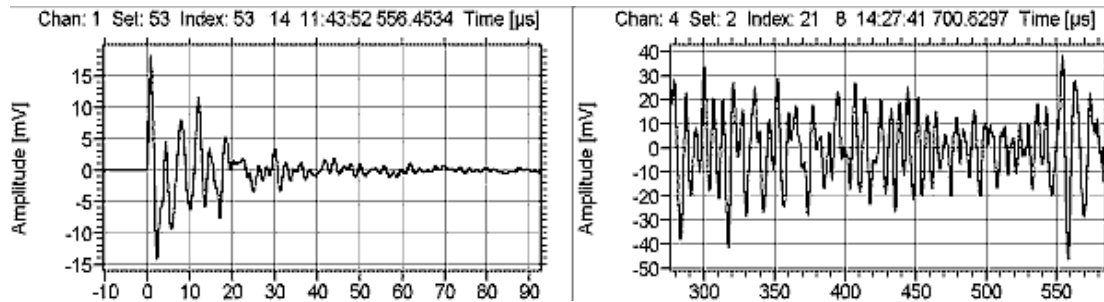


Figura 2 - À esquerda um sinal transiente e à direita um sinal contínuo de EA [5]

No caso que estudamos, os transientes detectados em ensaios de EA em grandes vasos de pressão são sinais de fratura provenientes do crescimento de uma trinca no vaso, e os sinais contínuos são normalmente provenientes de ruídos indesejáveis [5].

2.4 Processamento dos Sinais

Os sistemas de processamento de sinais de EA são responsáveis pela conversão do sinal detectado em um conjunto de dados e pela eliminação do ruído de fundo. Inicialmente são ajustados limites de detecção, um positivo e um negativo: se o sinal exceder um destes limites, significa um sinal de deformação. O tempo em que o sinal cruza pela primeira vez um dos limites, é conhecido como Tempo de Chegada e é fundamental para o cálculo da localização da trinca. A Figura 3 apresenta um exemplo de forma de onda com os limites positivo e negativo, assim como o tempo de chegada.

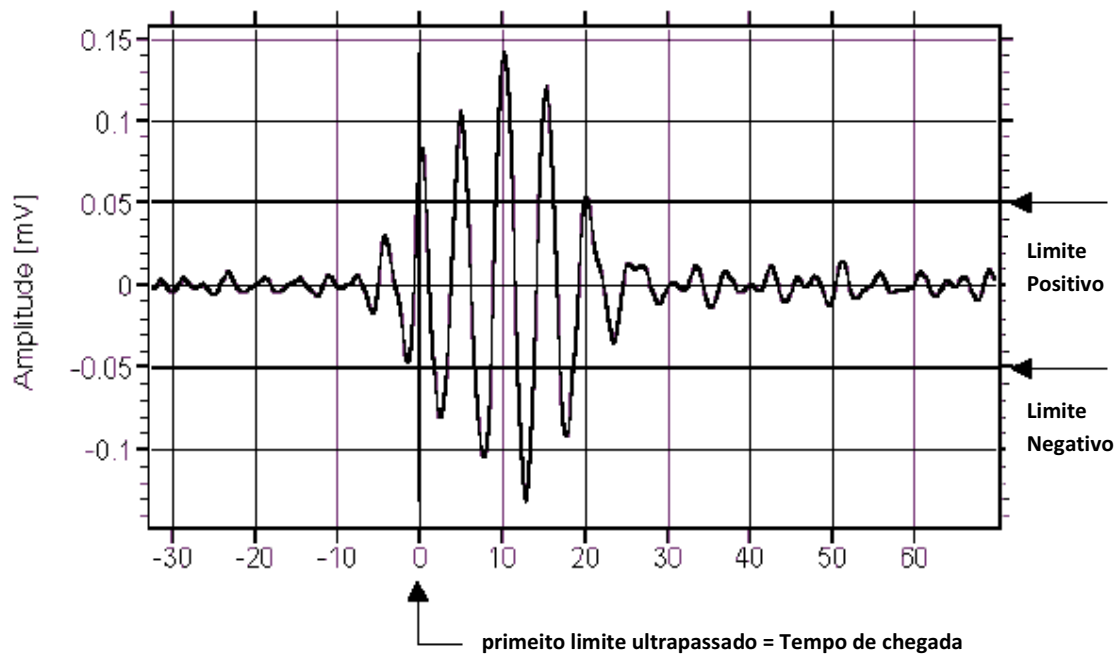


Figura 3 - Determinação do tempo de chegada [5]

No processamento, o sinal de EA é amostrado a cada $100 \mu\text{s}$. No gráfico da Figura 3 a cada 10 ms há 100 amostras, conseqüentemente no intervalo de tempo de 100 ms uma onda contém mais de 1000 amostras, demonstrando a necessidade de grande quantidade de memória e poder de processamento do sistema.

2.5 Parâmetros de EA

Os sistemas de EA permitem a captação de diversos parâmetros durante um ensaio, contudo os mais usados são: tempo de chegada (momento em que o sinal ultrapassa um dos limites pela primeira vez), máxima amplitude, tempo de subida (tempo que o sinal leva para alcançar a máxima amplitude), duração do sinal (intervalo de tempo entre a primeira e a última ultrapassagem do limite), energia (integral da amplitude quadrada

sobre o tempo de duração do sinal) e valor RMS (raiz média quadrada do ruído contínuo de fundo). (Figura 4)

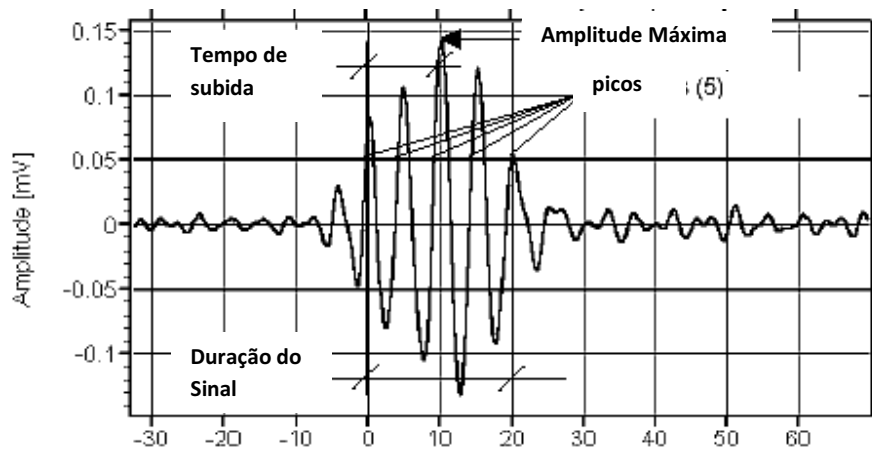


Figura 4 - Parâmetros de um sinal transiente [5]

A máxima amplitude é um dos parâmetros mais importantes, pois geralmente o sinal de trinca se caracteriza por valores médios para altos de amplitude e tem duração aproximada de 10 ms. Então sinais com menos de três pontos de cruzamento e duração menor do que 3 ms podem ser considerados como ruído e devem ser descartados.

Os principais fatores de influência na amplitude do sinal estão definidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores de Influencia [6]

| Características da estrutura e material | Principais fatores favorecendo sinais de grande amplitude | Principais fatores favorecendo sinais de baixa amplitude |
|---|---|--|
| Propriedades mecânicas | Alta resistência mecânica | Baixa resistência mecânica |
| Estrutura | Anisotropia | Isotropia |
| | Heterogeneidade | Homogeneidade |
| | Presença de descontinuidades | Material sem descontinuidades |
| | Tendência para forma maclas. | Muito baixa tendência para maclação |
| | Transformação martensítica | Transformação de fase por difusão |
| | Estrutura como fundido | |
| | Estrutura como soldado | Estrutura relaxada |
| | Estrutura de grão grosso | Estrutura de grão fino |
| Modo de ruptura | Crescimento de trinca | Escoamento uniforme |
| | Ruptura por clivagem | Deformação transversal |
| Modo de carregamento | Alta taxa de deformação | Baixa taxa de deformação |
| Geometria | Grandes espessuras | |
| Ambiente | Baixa temperatura | Alta temperatura |

3 Metodologia de Pesquisa

3.1 AQUISIÇÃO DOS SINAIS

3.1.1 Materiais

O corpo de prova de cada ensaio foi fabricado em aço, possuindo 1,81 m de comprimento, 20 polegadas de diâmetro e 14,7 mm de espessura. A Figura 5 ilustra o corpo de prova.

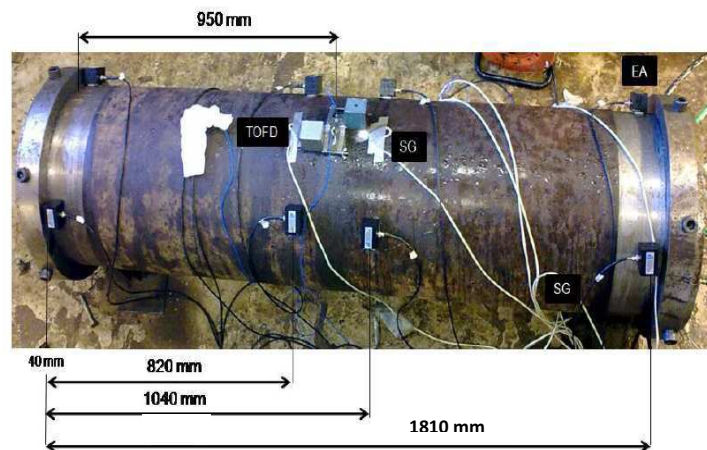


Figura 5 – Esquema de posicionamento dos sensores na superfície do corpo de prova

3.1.2 Ensaios de Aquisição de Sinais de Emissão Acústica

Os sinais de EA utilizados neste trabalho se referem à realização de três ensaios (de um total de seis) de um projeto intitulado “Inspeção de Dutos Rígidos” entre a Petrobras/Cenpes e a UFRGS/Laboratório de Metalurgia Física, onde descontinuidades são inseridas no duto e monitoradas e medidas por sistema de inspeção ultrassônica com a técnica *time of flight diffraction* (ToFD). A técnica ToFD está baseada na difração do feixe ultra-sônico causada pelas extremidades superiores e inferiores de um refletor, neste trabalho a descontinuidade inserida no duto.[7]

Os sinais foram adquiridos usando um aparelho da marca PAC, modelo Disp 16C com a utilização de 8 canais (sensores R151-AST da PAC). No primeiro ensaio (denominado Ensaio 1) foram adquiridos os seguintes parâmetros de emissão acústica: *Rise* (Tempo de subida), *Count* (Contagem), *Energy* (Energia), *Duration* (Duração), AMP (Amplitude), A-Freq, RMS, ASL, PCNTS, R-Freq, I-Freq, SIG-Strength e ABS-Energy. A partir do segundo ensaio (denominado Ensaio 2) além dos parâmetros do Ensaio 1, também foram coletados: Freq-PP1, Freq-PP2, Freq-PP3, Freq-PP4, C-Freq e P-Freq.

A Tabela 2 apresenta a descrição de todos os parâmetros utilizados nos ensaios.

Tabela 2 - Parâmetros de Emissão Acústica coletados

| Parâmetro | Descrição |
|---------------------|---|
| <i>Rise</i> | Tempo do primeiro pico a ultrapassar o limiar de referência até o pico de amplitude máxima. |
| <i>Count</i> | Número de vezes em que o sinal ultrapassa o limiar, dentro do valor definido de HDT. |
| <i>Energy</i> | Integral do valor absoluto, ou módulo, de cada pico da onda. Como se trata de um sinal temporalmente discreto, somam-se os valores das amostras da forma de onda retificada. Cabe salientar que a amplitude aqui se refere a uma medida de tensão/voltagem e não decibel. |
| <i>Duration</i> | Intervalo de tempo entre a primeira e a última ultrapassagem do limite, dentro do valor pré-estabelecido de HDT. |
| AMP | Amplitude máxima do sinal, em dB. |
| A-Freq | Frequência Média: a definição é contagem sobre duração, [count/duration]. |
| RMS | Raiz da integral dos valores de tensão ao quadrado dividida pelo intervalo de tempo dado pela diferença de tempo entre os limites superior e inferior de integração. |
| ASL | Nível médio do sinal, em dB. |
| PCNTS | Número de picos até a amplitude máxima ser alcançada, sempre levando em consideração o limiar de referência. |
| R-Freq | Frequência de reverberação: definida por: [contagem – contagem ao pico] / [duração - tempo de subida]. |
| I-Freq | Frequência de Iniciação (definida por: contagem ao pico / tempo de subida) |
| <i>Sig-Strength</i> | Intensidade ou potência do sinal: praticamente a definição de energia, porém com coeficiente mais simples de $\sin(\pi/4)$. |
| <i>ABS-Energy</i> | Energia Absoluta: quantidade real de energia sendo a unidade base pico Joule, definido pela soma das amplitudes das amostras ao quadrado dividido pela impedância de 10 kOhm. É importante lembrar que este parâmetro é normalizado. |
| Freq-PP1 | Primeira potência parcial. |
| Freq-PP2 | Segunda potência parcial. |
| Freq-PP3 | Terceira potência parcial. |
| Freq-PP4 | Quarta potência parcial. |
| C-Freq | Centróide de frequência: não necessariamente a frequência central, correspondente ao centro do espectro, mas uma frequência que leva em consideração “pesos” devido à magnitude e espalhamento. |
| P-Freq | Frequência pico: componente de frequência de maior magnitude no espectro. |

3.1.3 Definição das Classes

A partir da curva de Pressão de ensaio hidrostático e Ultrassom (ToFD) por Tempo, os sinais foram separados em duas classes e em três classes.

Para duas classes definiu-se:

1. Sem Propagação (SP) – Enquanto a profundidade da trinca se mantém constante.
2. Propagação (P) – A partir do primeiro sinal de crescimento da trinca até o rompimento do corpo de prova.

E para três classes:

1. Sem Propagação (SP) – Enquanto a profundidade da trinca se mantém constante.
2. Propagação Estável ou Elástica (PE) – Crescimento lento da trinca por um longo intervalo de tempo. O deslocamento retorna retirando a pressão.
3. Propagação Instável ou Plástica (PI) – Crescimento acentuado da trinca por um curto intervalo de tempo até o rompimento. O deslocamento não retorna retirando a pressão.

Após a determinação dos intervalos de cada classe os sinais foram sincronizados com o tempo de pressurização e do crescimento da trinca.

As curvas de cada ensaio são apresentadas no Capítulo 4.

3.1.4 Pré-processamento dos Dados

Os arquivos separados de sinais de EA foram agrupados no tempo e exportados com formato .dat para serem processados. Posteriormente, os dados foram normalizados adequadamente para melhor desempenho no treinamento das redes neurais.

3.2 Desenvolvimento dos Classificadores

A discriminação entre as classes foi feita por classificadores de padrões não-lineares usando redes neurais artificiais *feedforward* treinadas pelo algoritmo *error backpropagation* [8]. Foram utilizadas redes com duas camadas de neurônios: uma camada intermediária e uma de saída.

Por se tratar de uma rede de classificação de padrões, o número de neurônios da camada de saída corresponde ao número de classes definidas, com um neurônio de saída por classes, neste trabalho, 2 ou 3 neurônios.

Com a finalidade de se encontrar a melhor configuração de rede para o treinamento e teste (generalização), treinaram-se diversas redes sempre com o mesmo conjunto de treino e teste sorteado aleatoriamente na proporção 80/20, utilizando 3 neurônios na camada de saída, tangente hiperbólica como função de ativação e treinamento em batelada. Variou-se o número de neurônios na camada intermediária de 1 até 10, testando vários tipos de parâmetros de treinamento: taxa de aprendizagem (α) fixo, sem momento; α fixo, com momento; α variável, sem momento; e α variável, com momento.

A quantidade “ótima” de neurônios foi determinada pela análise de uma tabela de índice de acerto em função da variação do número de neurônios na camada intermediária. No

Capítulo 4 são apresentadas estas tabelas e são definidos o número de neurônios da camada intermediária e os parâmetros da rede “ótima”.

3.2.1 Classificação Probabilística

Neste trabalho, foram definidos dois tipos de classificação, **Sem Reclassificação** – admitindo como classificação certa apenas quando o neurônio da classe é o único positivo, e **Com Reclassificação** – admitindo como classificação certa se a saída do neurônio for a maior entre as saídas das classes.

Através das distribuições normais das saídas dos neurônios, é possível calcular a probabilidade de classificação correta para cada classe (quando a excitação interna U do neurônio de saída da classe for maior do que zero, se denomina verdadeiro positivo (VP)) e ainda, a probabilidade de haver erro de classificação (quando o U da classe for menor do que zero, se denomina de falso negativo (FN)). Levando-se em consideração a possibilidade de haver o caso de um U de outra classe ser maior também do que zero para a mesma entrada, denominando-se assim de falso positivo (PF), pode-se calcular a probabilidade de haver confusão entre as duas classes calculando-se a união entre estas duas probabilidades, $P(FN \cup PF)$, o que é feito através da Equação (3.1) [1], já que $P(FN)$ e $P(PF)$ são probabilidades não mutuamente exclusivas.

$$P(FN \cup PF) = P(FN) + P(PF) - P(FN \cap PF) \quad (3.1)$$

$P(FN \cup PF)$: probabilidade de ocorrer confusão entre as duas classes;

$P(FN)$: probabilidade de ocorrer falso negativo;

$P(PF)$: probabilidade de ocorrer falso positivo;

$P(FN \cap PF)$: probabilidade de interseção entre as duas classes.

A Figura 6 a seguir ilustra a forma de calcular estas probabilidades, mostrando a distribuição das saídas U da classe 1 e da classe 2 hipotéticas, para um conjunto de dados referentes à classe 1. A probabilidade de haver confusão entre estas duas classes é a soma da área hachurada de falso negativo (FN) com área de falso positivo (PF), dividida pela área total, que neste caso é 2 (soma da área sob a curva normal das duas distribuições).

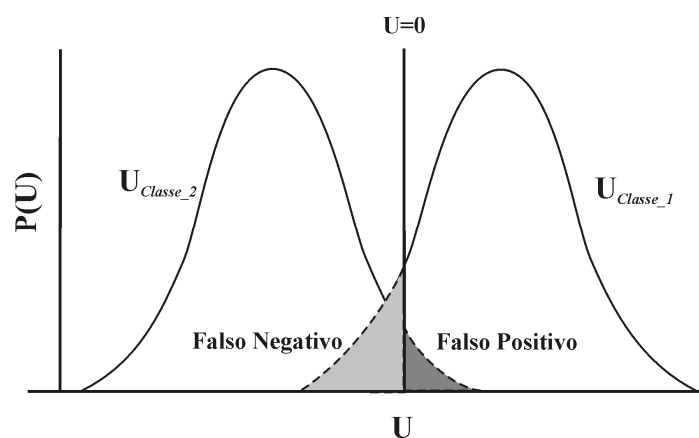


Figura 6 - Distribuição normal das saídas U de duas classes hipotéticas 1 e 2 mostrando a probabilidade de classificação correta, e de haver confusão de classificação entre estas duas classes (soma das áreas hachuradas dividida pela área total que é 2).[2]

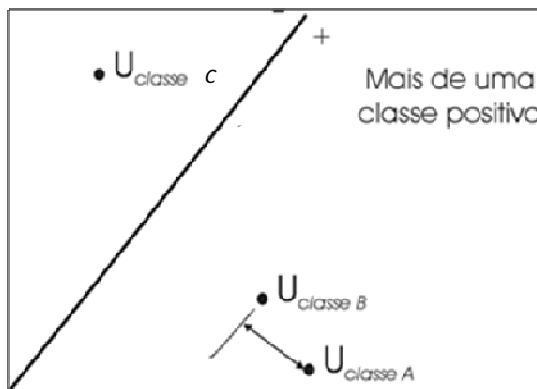
Para os sistemas de classificação, ressaltando-se mais uma vez, pode existir o caso de mais de uma saída positiva (mais de um U positivo), ou nenhuma saída positiva (todas as saídas U menores do que zero). Então, a probabilidade que se deseja calcular é a probabilidade de que o U da classe seja maior do que as saídas U das outras classes, Equação (3.2). Para tal, adota-se o maior valor de U dentre as saídas U da outras classes, calcula-se a diferença entre o U da classe e este valor, segundo a Equação (3.3). Ajustando-se uma nova distribuição normal para os resultados destas diferenças, pode-se calcular a área sob a curva cuja probabilidade da diferença é maior do que zero, o que

indicará a probabilidade de classificação correta com critério de reclassificação. Para ilustrar este conceito, apresenta-se uma situação hipotética mostrada na Figura 7, onde três classes são representadas por: A, B e C em um plano dividido em positivo e negativo. Na Figura 7-a, mostra-se o caso para quando houver mais de uma classe positiva. Neste caso calcula-se a diferença entre o U da classe A em questão, e o maior U das outras classes, representado na figura pelo U da classe B, já que o U da classe C é negativo. A Figura 7-b mostra o mesmo princípio, só que para quando todas as saídas U forem negativas. [2]

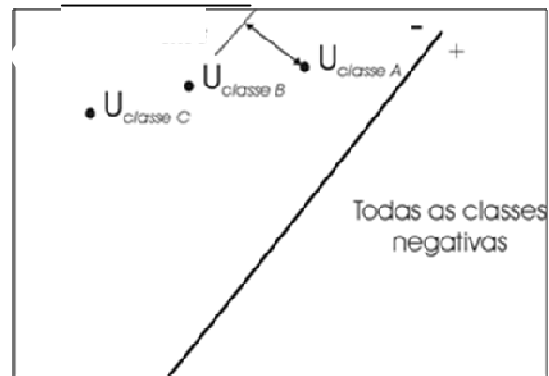
A Figura 8 ilustra a curva distribuição normal para a diferença calculada na Figura 7-a, mostrando a probabilidade de haver classificação correta e de ocorrer erro de classificação.

$$P(U_{classe}) > P(U_{Outras\ classes}) \quad (3.2)$$

$$U = U_{classe} - U_{m\acute{a}ximo\ das\ outras\ classes} \quad (3.3)$$



(a)



(b)

Figura 7 - (a) cálculo da diferença entre o U_a e U_b para quando há mais de um U positivo. (b) cálculo da diferença entre o U_a e U_b para quando todas as saídas U são negativas. [2]

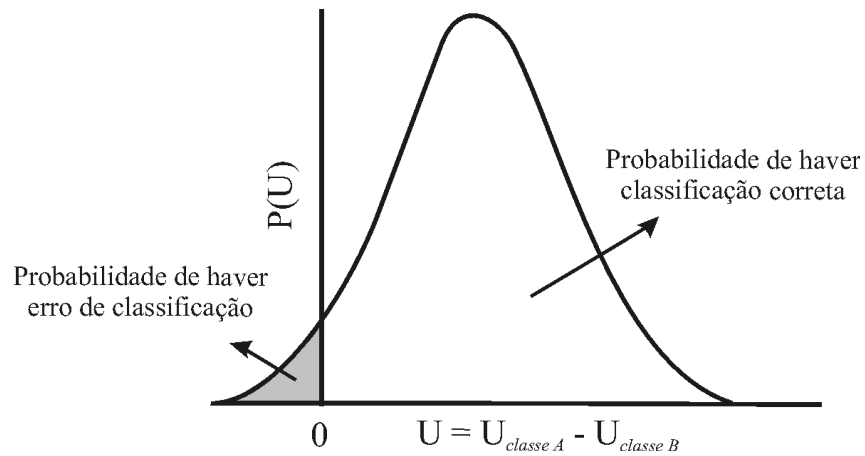


Figura 8 - Distribuição normal que permite calcular a probabilidade de ocorrer classificação correta usando o critério de reclassificação.[2]

3.3 Critério de Relevância

Neste trabalho, utilizou-se este método para avaliar a importância dos atributos de entrada acrescentados no Ensaio 2 e Ensaio 3.

Este critério mede a relevância de cada atributo de entrada do classificador, isto é, mede quanto este influencia na performance da rede neural. O método consiste em procurar mudanças significativas na resposta da rede, ao substituir os valores da variável avaliada pelo valor médio. [9]

A relevância $R(X_i)$ da componente X_i do vetor X pode ser calculada pela seguinte equação:

$$R(X_i) = \frac{\sum_{j=1}^P \|y(x_j) - y(x_{ji})\|^2}{P} \quad (3.4)$$

$R(X_i)$: relevância da componente x_i dos vetores de entrada x ;

P : número de padrões (treinamento ou teste);

$y(x_j)$: vetor de saída da rede neural para cada padrão i x de entrada apresentado;

x_{ji} : vetor de entrada x_j , em que a i -ésima componente foi substituída pelo seu valor médio tomado sobre todos os vetores de entrada;

$y(x_{ji})$: saída da rede para a entrada x_{ji} .

3.4 Acurácia dos Classificadores

O desempenho de um classificador pode ser medida pela acurácia, a qual expressa o grau de sucesso de classificar corretamente uma amostra. De acordo com Diamantidis [9], três métodos têm sido aplicados para estimar a acurácia de um classificador:

1. Avaliação com amostragem aleatória.
2. Validação-cruzada
3. *Bootstrap*

Todas as técnicas baseiam-se em amostragem aleatória, diferindo apenas na implementação da estimação da acurácia do classificador.

No método de avaliação com amostragem aleatória, o conjunto original de dados (com n amostras) é dividido aleatoriamente em dois conjuntos: um conjunto de treino contendo $p \times n$ amostras, e outro de teste com $(1-p) \times n$ amostras. Este processo é repetido uma quantidade específica de vezes e calculado o valor médio dos resultados.

Neste trabalho, a acurácia dos classificadores foi calculada pela avaliação com amostragem aleatória, devido a grande quantidade de entradas disponíveis não justifica o uso dos outros métodos [9]. Para cada classificador foram sorteados aleatoriamente 10 conjuntos de treino e teste, cada se dividindo em uma proporção de aproximadamente 80% para treino e 20% para teste [1].

4 Resultados e Discussão

4.1 Ensaio 1

De acordo com o descrito na Seção 3.1.2, neste ensaio foram coletados os seguintes parâmetros: Rise (Tempo de subida), Count (Contagem), Energy (Energia), Duration (Duração), AMP (Amplitude), A-Freq, RMS, ASL, PCNTS, R-Freq, I-Freq, SIG-Strength e ABS-Energy. Vale destacar que durante o teste hidrostático não houve rompimento do duto, fato que influencia nas características dos sinais de EA emitidos.

4.1.1 Definição dos parâmetros de treinamento

De acordo com a Figura 9, o conjunto de sinais foi separado em 3 classes: 2929 sinais da classe Sem Propagação (SP), 1517 sinais da classe Propagação Estável (PE) 2986 da classe Propagação Instável (PI). E então foi realizado o estudo para encontrar a rede “ótima”, conforme descrito no Capítulo 3.

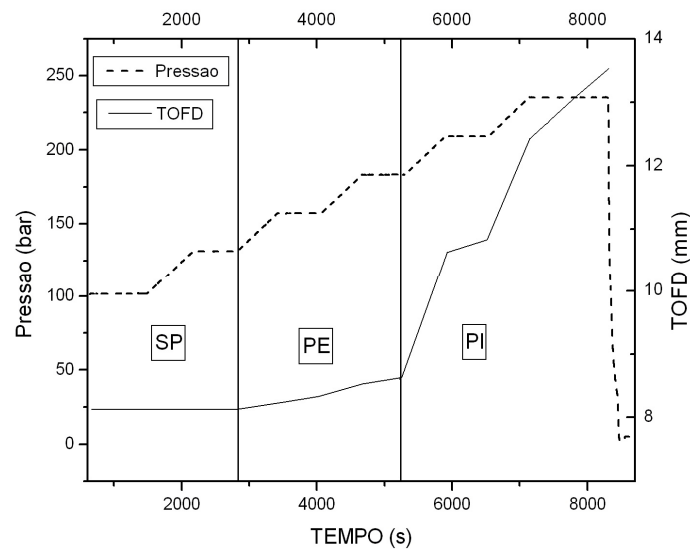


Figura 9 - Gráfico Pressão e ToFD por Tempo

A Tabela 3 mostra os índices de acerto em relação ao número de neurônios utilizados para treinamento. Contudo, foram observados resultados inesperados, no caso do treinamento sem momento e com taxa de aprendizado variável, a taxa de acerto com quatro neurônios foi maior que o dobro do que o treinamento com cinco neurônios, indicando incoerência no treinamento, provavelmente a captura por um mínimo local de difícil acesso, devido a taxa de aprendizagem alcançar valores muito elevados.

Tabela 3 - Índice de acerto em função da variação do número de neurônios na camada intermediária da rede

| Neurônios camada Intermediária | Sem momento | | Com momento | | Sem momento e alfa variável | | Com momento e alfa variável | |
|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|
| | Treino | Teste | Treino | Teste | Treino | Teste | Treino | Teste |
| 1 | 0,0 | 0,0 | 0,43727 | 0,47106 | 14,867 | 16,353 | 12,159 | 11,844 |
| 2 | 18,214 | 18,371 | 20,249 | 21,198 | 18,584 | 17,429 | 18,803 | 18,371 |
| 3 | 34,359 | 35,599 | 19,189 | 17,766 | 18,634 | 19,112 | 18,87 | 17,295 |
| 4 | 30,979 | 31,629 | 27,666 | 27,12 | 56,475 | 56,662 | 29,835 | 31,561 |
| 5 | 25,597 | 26,11 | 23,041 | 22,611 | 19,324 | 18,506 | 38,11 | 37,416 |
| 6 | 36,983 | 37,887 | 36,916 | 39,3 | 56,576 | 57,537 | 37,084 | 37,954 |
| 7 | 34,174 | 35,061 | 35,94 | 34,522 | 55,97 | 57,201 | 23,562 | 22,342 |
| 8 | 34,494 | 34,791 | 34,157 | 33,782 | 55,954 | 55,249 | 36,495 | 37,281 |
| 9 | 35,621 | 36,07 | 35,738 | 35,397 | 54,205 | 53,163 | 39,775 | 37,887 |
| 10 | 35,318 | 35,33 | 37,723 | 37,079 | 52,321 | 52,153 | 40,531 | 38,223 |

Buscando evitar a captura por um mínimo local durante o treinamento, limitou-se a taxa de aprendizado em no máximo 0,2. E a partir daí os resultados apresentados foram como o esperado. Como pode ser observado na Tabela 4, a taxa de acerto aumenta de acordo com o aumento do número de neurônios.

Tabela 4 - Índices de acerto em função da variação do número de neurônios na camada intermediária da rede, com taxa de aprendizado (α) máximo igual a 0,2.

| Neurônios camada Intermediária | Sem momento | | Com momento | | Sem momento e alfa variável | | Com momento e alfa variável | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| | Treino | Teste | Treino | Teste | Treino | Teste | Treino | Teste |
| 1 | 15,76 | 16,22 | 39,37 | 39,57 | 14,56 | 13,73 | 8,61 | 7,40 |
| 2 | 18,95 | 17,63 | 30,05 | 29,21 | 34,93 | 35,26 | 0,12 | 0,13 |
| 3 | 19,88 | 19,65 | 33,10 | 30,69 | 18,28 | 18,10 | 18,38 | 18,84 |
| 4 | 22,00 | 21,60 | 19,21 | 18,04 | 18,90 | 18,30 | 29,20 | 28,20 |
| 5 | 32,27 | 32,97 | 40,33 | 39,57 | 35,47 | 36,07 | 35,54 | 36,31 |
| 6 | 28,37 | 26,99 | 33,47 | 34,66 | 39,64 | 37,28 | 35,52 | 36,95 |
| 7 | 36,76 | 36,34 | 34,86 | 34,19 | 31,25 | 32,50 | 37,45 | 38,49 |
| 8 | 31,65 | 31,70 | 31,42 | 31,56 | 36,51 | 35,80 | 37,66 | 37,08 |
| 9 | 36,51 | 37,15 | 37,49 | 35,46 | 35,65 | 37,42 | 33,54 | 36,00 |
| 10 | 35,82 | 35,06 | 36,26 | 36,27 | 39,17 | 37,08 | 36,68 | 34,93 |

Foi definida como rede "ótima" uma rede com 6 neurônios, treinada sem momento, α variável com valor inicial igual a 0,05, fator de incremento de 1,05, fator de decréscimo de 0,9 e alfa máximo de 0,2 (parâmetros ajustados no programa MATLAB usando a função `traingd`).

4.1.2 Classificação sem Duplicação de Dados

Definido os melhores parâmetros a serem utilizados no treinamento da rede, partiu-se para os testes da avaliação da acurácia do classificador. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos de classificação para 10 conjuntos diferentes de treino e teste.

Tabela 5 - Estimação da acurácia de classificação para os 10 pares de conjuntos sorteados

| Conjunto | Treino | Teste |
|-----------------|---------------|--------------|
| 1 | 57,94 | 56,33 |
| 2 | 57,60 | 56,12 |
| 3 | 55,90 | 54,78 |
| 4 | 57,62 | 58,08 |
| 5 | 57,82 | 57,81 |
| 6 | 57,74 | 56,86 |
| 7 | 57,45 | 57,54 |
| 8 | 57,52 | 57,13 |
| 9 | 57,67 | 56,73 |
| 10 | 57,67 | 57,47 |
| Media | 57,49 | 56,88 |

Estes primeiros resultados demonstram que é possível realizar a separação das três classes, pois o pior caso esperado seria uma classificação com taxa de acerto de 33%, isto é, cada entrada ser classificada aleatoriamente. Contudo os valores de acerto alcançados ainda são baixos para a rede ser utilizada como um classificador. É necessária a aplicação de técnicas adicionais de pré-processamento e pós-processamento, descritas nos próximos itens.

4.1.3 Classificação com Duplicação de Dados

No conjunto de sinais deste ensaio, a classe PE contém 1517 dados, número equivalente a cerca de metade das classes SP e PI. Para equilibrar o número de dados das três classes, visando o não favorecimento das classes mais populosas no treinamento da rede, o número de dados de PE foi duplicado para 3034 dados.

Com o novo conjunto formado, dividiram-se por meio de sorteio aleatório os conjuntos de treino e teste na proporção de 80/20, respectivamente. Neste caso, apenas um conjunto

de treino e um de teste foram sorteados, pois neste e nos demais testes a seguir o objetivo é avaliar o desempenho das técnicas empregadas no aumento da taxa de acerto, caso algumas das técnicas empregadas nas próximas seções apresente aumento significativo da taxa de acerto será realizado o teste de acurácia.

Com os mesmos parâmetros de configuração ótima de treinamento já definidos, recorreu-se ao uso de um conjunto de validação com 20% de sinais escolhidos aleatoriamente do conjunto de treino para controle de super treinamento (*overtraining*). Com o treinamento ajustado para 6000 épocas, o mesmo foi interrompido em 3820 pela validação. Para a classificação foi utilizado o critério de reclassificação.

A Tabela 6, referente aos sinais de treinamento, mostra que as classes SP e PI têm índices similares de acerto. A classe PE tem o maior índice de acerto de classificação, 64,57%. O fato mais importante que se pode observar é que as classes SP e PE têm os maiores índices de confusão, o que pode ser esperado em função da pouca discriminação destes eventos em emissão acústica. SP e PE têm pouca confusão com PI, embora PI tenha razoável confusão com SP e, principalmente, PE, o que na prática é um resultado indesejável, pois seriam casos de falsos negativos.

Quanto ao conjunto de testes, também apresentados na Tabela 6, estes comprovam a generalização do classificador devido aos valores similares de acerto em relação ao conjunto de treinamento.

Tabela 6 - tabela confusão dos conjuntos de treino e teste com duplicação de dados

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|----------------|---|------------|----------|-----------|---|---------|---------|
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1083/46% | 1214/52% | 47/2% | SP | 275/47% | 298/51% | 12/2% |
| PE | 846/35% | 1568/64,5% | 14/0,5% | PE | 109/35% | 191/63% | 3/2% |
| PI | 487/20% | 761/32% | 1141/48% | PI | 124/21% | 202/34% | 271/45% |
| ACERTOS | 3792/53% | | | | 737/50% | | |

4.1.3.1 Histogramas de classificação com três classes

Os histogramas a seguir apresentam a distribuição das saídas dos neurônios da rede visando à avaliação da probabilidade de um dado sinal pertencer a uma classe. Estes histogramas foram obtidos com os valores calculados a partir da Equação 3. Valores acima de zero são sinais classificados corretamente e valores inferiores a zero são sinais classificados erroneamente. Quanto mais próximo de zero, mais difícil é a classificação do sinal. As Figuras 10-a e 10-b mostram os histogramas obtidos para os valores de Z_1 (diferença entre o U da classe SP e o U da classe mais próxima) para os conjuntos de treinamento e teste, respectivamente. Analogamente, foram elaborados os gráficos das Figuras 11 e 12 para as classes PE e PI, respectivamente.

Pela Figura 10, fica evidenciado que os valores calculados de Z estão próximos de zero, mostrando que a discriminação da SP de PE é complexa, ratificando os resultados apresentados de classificação para sinais de treinamento e teste.

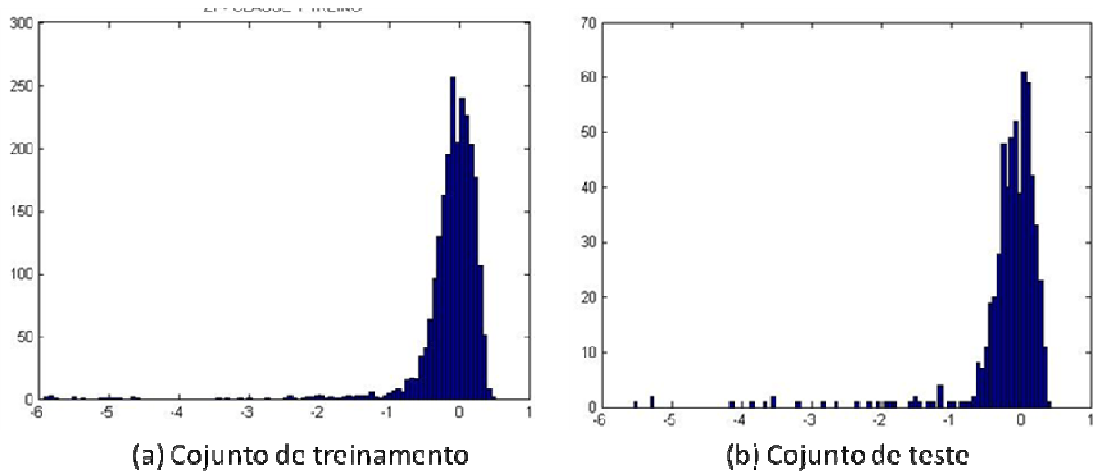


Figura 10 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos conjuntos sorteados para classificação

Assim como para classe SP, os gráficos apresentados na Figura 11 atestam que a separação da classe PE das demais classes é complexa, visto que os valores de Z também se encontram próximos de zero.

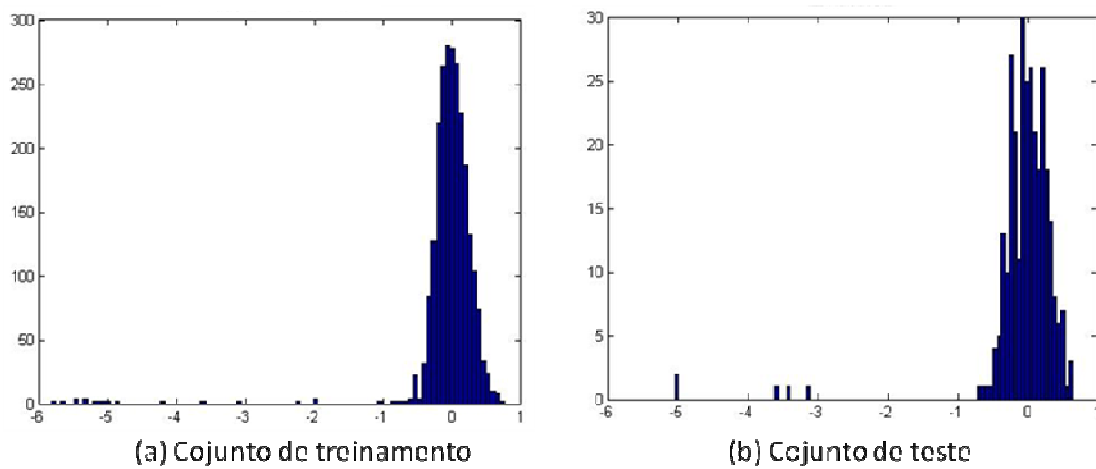


Figura 11 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos conjuntos

Em relação à classe PI, os gráficos de Z apresentados na Figura 12 mostram que a discriminação dessa classe apresenta maior probabilidade de acerto, coerente com os

valores de classificação apresentados na Tabela 6, pois muitos valores de Z estão posicionados acima de zero (pico em torno de 6).

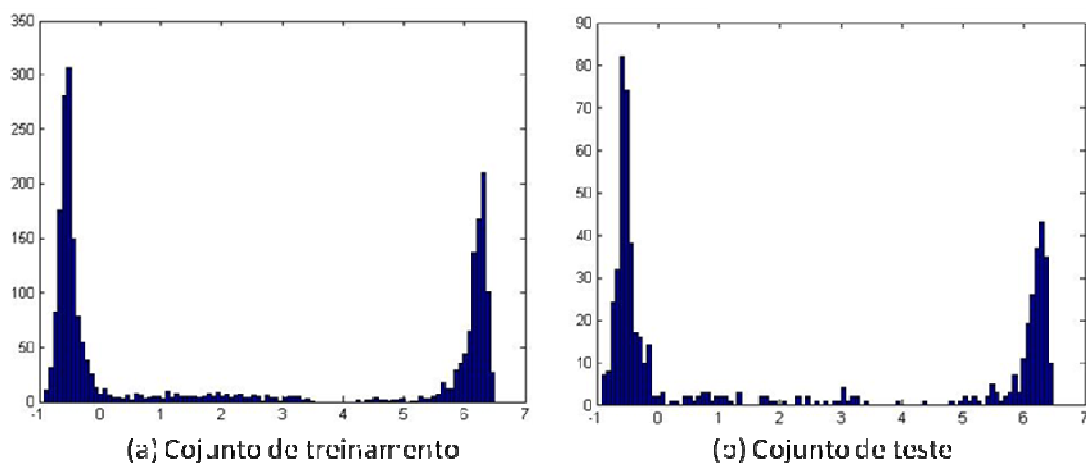


Figura 12 – Distribuição dos valores de Z_3 para a classe PI em relação aos conjuntos sorteados para a classificação.

4.1.4 Classificação com Duas Classes

A partir dos resultados apresentados no seção 4.1.3 ficou evidente que a dificuldade está em classificar os sinais SP e PE. Com o objetivo de melhorar esta classificação, treinou-se uma rede utilizando como entrada os sinais das classes SP e PE, apenas. Foi utilizado o mesmo conjunto de parâmetros de configuração ótima e os mesmos conjuntos de treinamento e teste do seção 4.1.3, excluindo-se a classe PI. O treinamento foi ajustado para as mesmas 6000 épocas, entretanto, não foi utilizado nenhum critério de parada.

Para este treinamento não são apresentadas tabelas de confusão, pois o objetivo deste treinamento foi observar a dispersão das saídas do classificador e através disto determinar se os parâmetros escolhidos como entrada são suficientes para fazer a separação entre as duas classes, já que neste ensaio não estão presentes 6 parâmetros, os quais foram incluídos a partir do segundo ensaio.

A Figura 13 mostra os histogramas obtidos para os valores de Z1 (diferença entre o U da classe SP e o U da classe PE) para os conjuntos de treinamento e teste. Analogamente, foram elaborados os gráficos da Figura 14 para a classe PE.

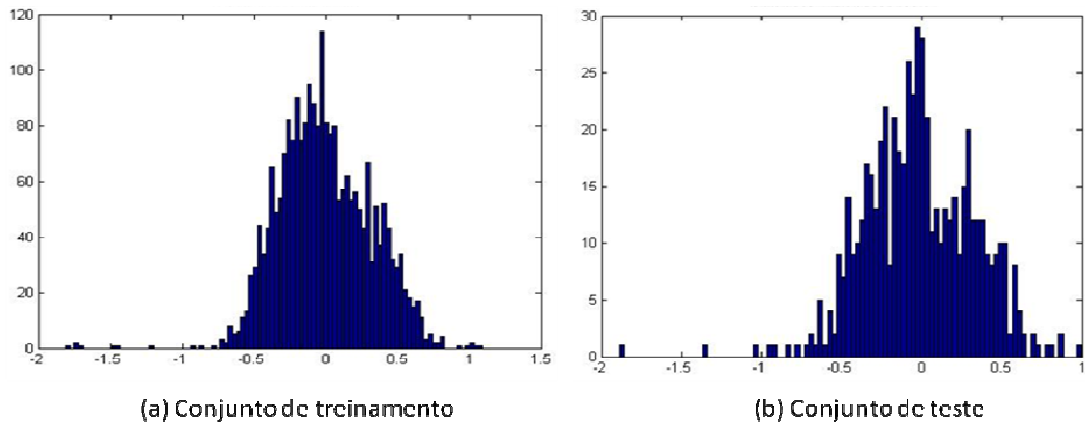


Figura 13 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos conjuntos sorteados para classificação.

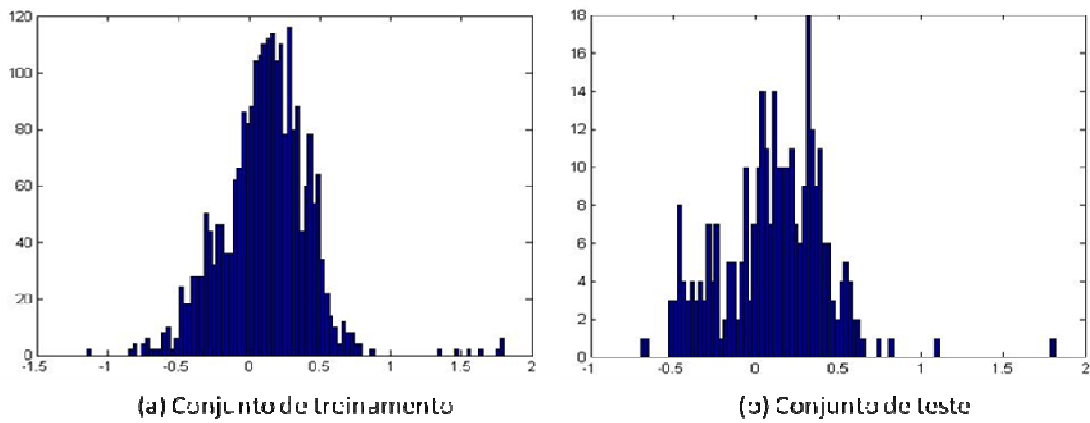
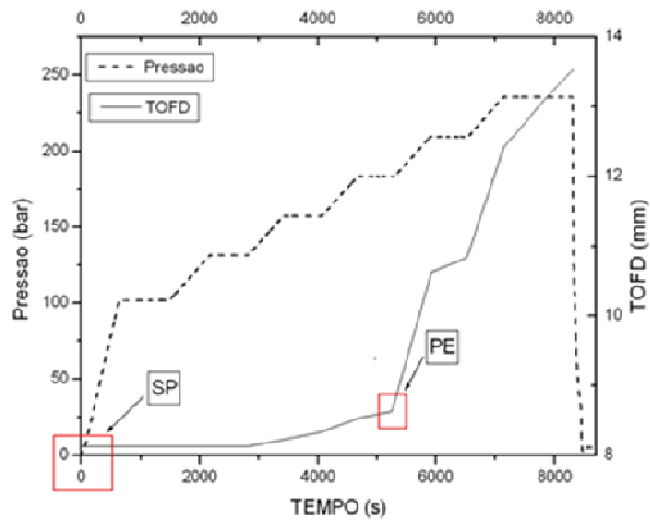


Figura 14 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos conjuntos sorteados para classificação.

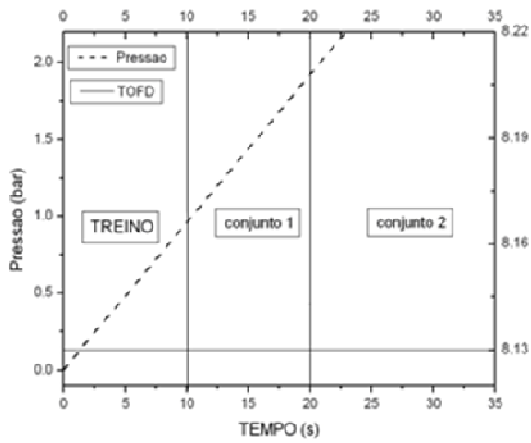
As Figuras 13 e 14 demonstram que a rede ainda não é capaz de discriminar com clareza as duas classes. Com a classificação correta de aproximadamente metade dos dados, fica comprovada a ineficiência da mesma nesta condição de parâmetros extraídos dos sinais.

Os histogramas demonstram uma grande região de confusão, isto é, uma grande concentração de dados em torno de zero, indicando que as duas classes podem estar misturadas. Buscando uma melhor separação entre as classes, treinou-se uma nova rede utilizando os mesmos parâmetros ótimos já definidos, porém, com entradas diferentes.

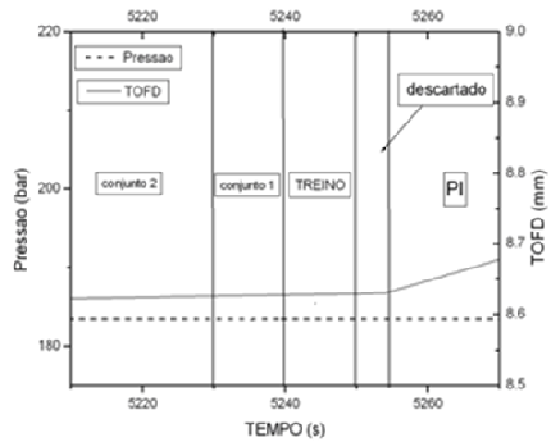
O conjunto de treinamento foi formado com os cem primeiros elementos da classe SP e os cento e cinquenta últimos da classe PE (destes foram desprezados os cinquenta últimos sinais). Desta forma, esperou-se obter sinais que com certeza fossem de SP e PE, já que foram selecionados sinais de entradas bem distantes. O conjunto de treinamento ficou com um total de 200 dados. A Figura 15-a mostra o gráfico de Pressão e ToFD por tempo, destacados o conjunto de SP e o conjunto de PE. As Figuras 15-b e 15-c mostram o conjunto de SP e de PE, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 15 - Divisão dos novos conjuntos de treinamento e teste

Para os testes desta nova rede, foram utilizados dois conjuntos diferentes de sinais. O conjunto 1 – Figura 15-b – contendo um total de duzentos elementos, cem da classe SP e cem da classe PE. Os sinais escolhidos da classe SP foram os cem elementos sequenciais após os elementos extraídos para treinamento. Os sinais da classe PE – Figura 15-c – foram formados separando os duzentos e cinquenta últimos sinais, desprezando-se os cento e cinquenta últimos (destes, 100 compuseram o conjunto de treinamento). No conjunto 2, foram retirados os duzentos primeiros elementos da classe SP, pois estes foram utilizados no treinamento e no teste 1, e os sinais restantes foram usados para o segundo teste. Em relação à classe PE, procedeu-se da mesma forma, foram retirados os 250 últimos elementos da classe PE, pois estes já foram utilizados no treinamento e no teste 1. Os sinais que sobram foram utilizados para o segundo teste.

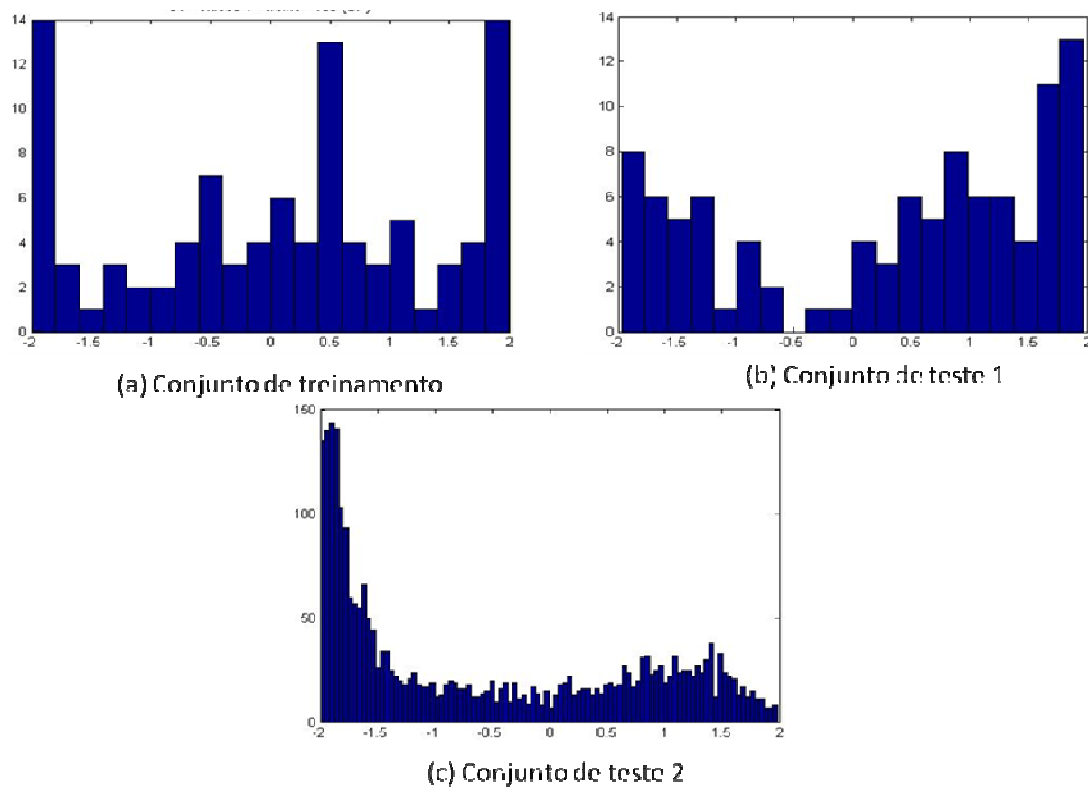


Figura 16 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos conjuntos sorteados para classificação

A Figura 16 mostra que muitos dos sinais SP foram classificados como PE. Contudo, a Figura 17-c apresenta um aumento na taxa de acerto e o pico em torno de 2, mostrando que para os sinais da classe PE a nova rede obteve uma melhora na classificação. Embora longe do ideal esperado para discriminação destas duas classes de sinais de emissão acústica.

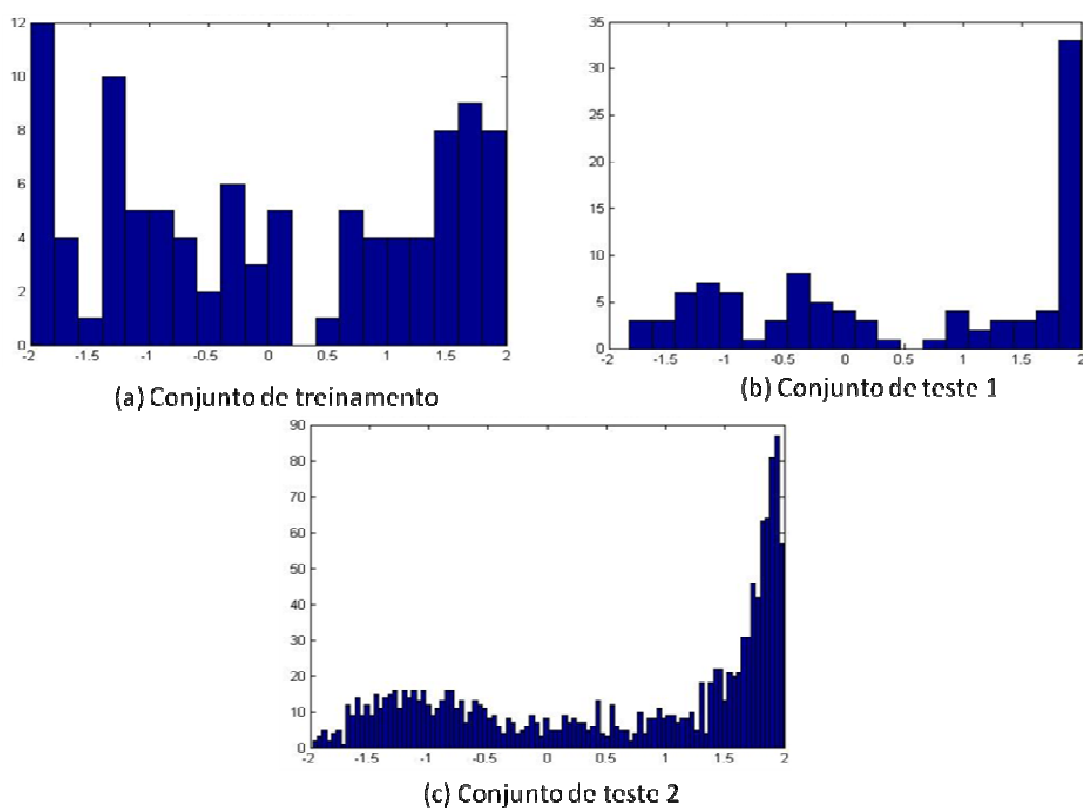


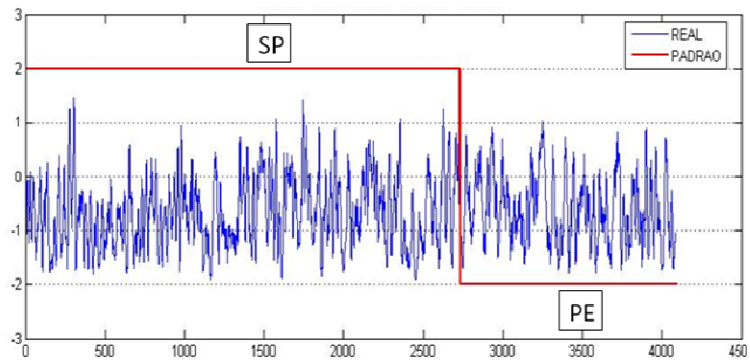
Figura 17 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos conjuntos sorteados para classificação.

4.1.4.1 Filtragem da Saída da Rede

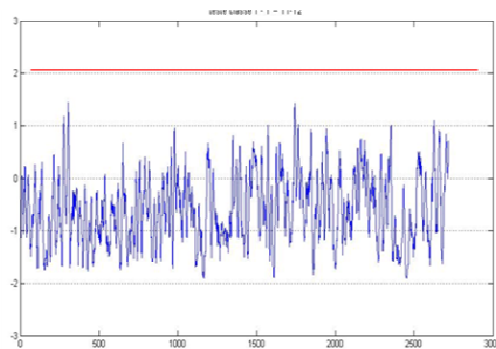
De acordo com os resultados apresentados até o momento, ainda não foi possível definir uma rede capaz de classificar corretamente sinais de SP e PE. Na tentativa de melhorar a classificação, aplicou-se um filtro média móvel à saída da rede, utilizando uma janela de 10 elementos.

A partir do valor de cada média se faz a diferença do U_1 (classe SP) pelo U_2 (classe PE), para valores maiores que zero a saída é classificada como SP e para valores menores que zero é classificada como PE. A Figura 18 apresenta o gráfico da saída definida como $U_{\text{médio}} = U_{1\text{médio}} - U_{2\text{médio}}$, a linha vermelha serve como referência do valor teórico ideal de $U_{\text{médio}}$.

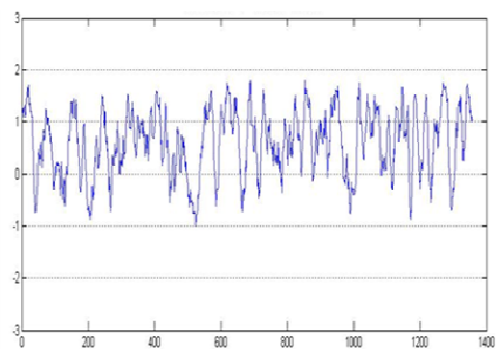
A Figura 18-a mostra que, mesmo com a filtragem, os sinais SP não conseguem ser distinguidos de PE. Na Figura 18-b fica comprovada a ineficiência da classificação, neste teste apenas sinais da classe SP são aplicados à rede e de acordo com o padrão (linha vermelha) a saída deveria estar em torno de 2, no entanto, mais de 80% estão abaixo de zero, isto é, foram classificados como PE. Analogamente a figura 18-c representa os sinais da classe PE, mostrando resultados melhores, mas que sozinho não comprova a eficiência da rede.



(a)



(b)



(c)

Figura 18 - (a) - $U_{\text{méd}} = U1_{\text{méd}} - U2_{\text{méd}}$; (b) Apenas saída SP : $U = U1 - U2$; (c) Apenas PE: $U = U2 - U1$.

4.1.5 Classificação com Novo Critério de Separação das Classes

Continuando a busca por resultados melhores de classificação, um novo critério de classificação foi definido, onde se definiu que se a pressão for mantida constante e o defeito mesmo assim crescer, no gráfico de acompanhamento com ToFD da Figura 19, há crescimento instável do mesmo, definindo os sinais da classe PI. Na situação de crescimento da pressão sem crescimento de defeito, define-se SP, e para as faixas de tempo com crescimento da pressão e crescimento do defeito, define-se PE. Duas novas redes foram treinadas com dois conjuntos de treinamento diferindo apenas nos intervalos

de tempo selecionados de PE. As Tabelas 7 e 8 apresentam as faixas de formação das classes das redes A e B, respectivamente.

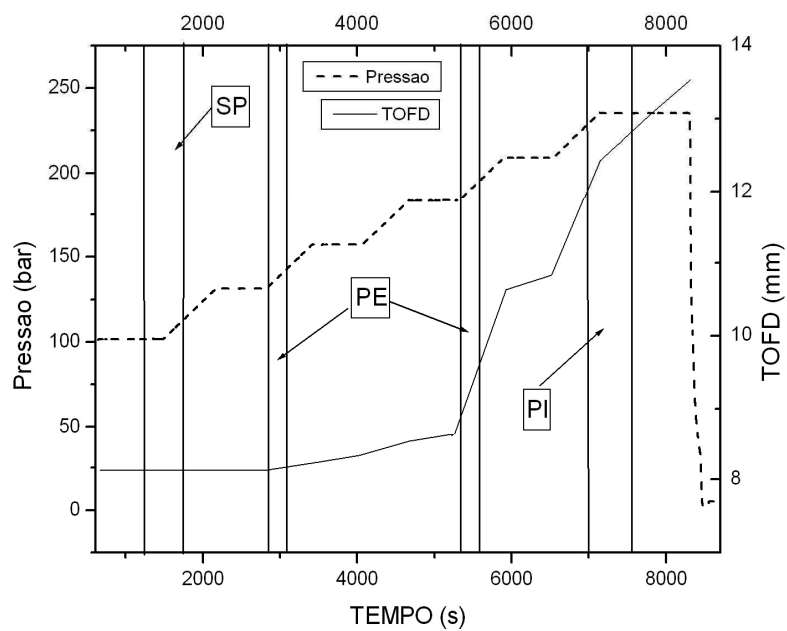


Figura 19 - Separação das classes para Rede A

Tabela 7 - Definição da separação entre as classes para o treinamento da rede A

| TIPO DE SINAL | TEMPO (s) | QUANTIDADE DE SINAIS |
|---------------|---------------------------|----------------------|
| SP | 1250 a 1750 | 500 |
| PE | 2850 a 3100 e 5350 a 5600 | 500 |
| PI | 7000 a 7500 | 500 |

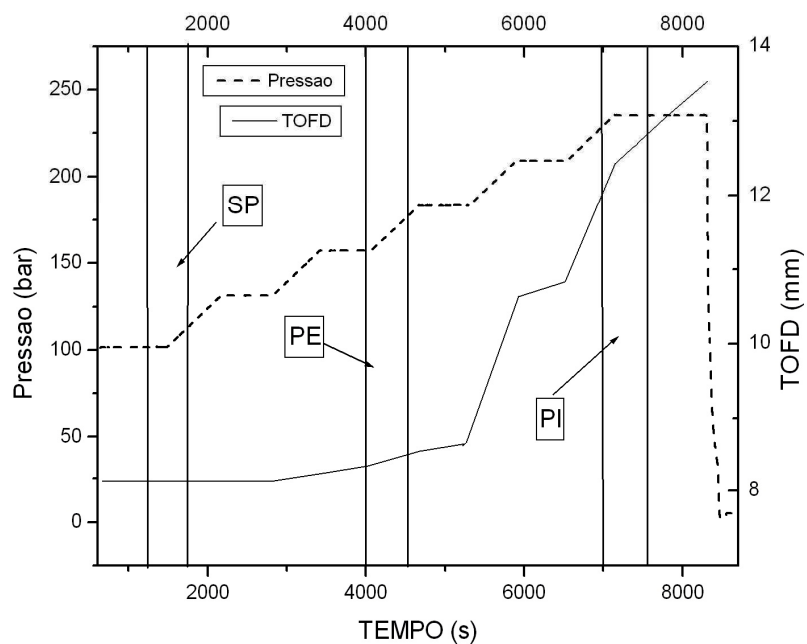


Figura 20 - Separação das classes para Rede B

Tabela 8 - Definição da separação entre as classes para o treinamento da rede B

| TIPO DE SINAL | TEMPO (s) | QUANTIDADE DE SINAIS |
|----------------------|------------------|-----------------------------|
| SP | 1250 a 1750 | 500 |
| PE | 4000 a 4500 | 500 |
| PI | 7000 a 7500 | 500 |

As Tabelas 9 e 10 comprovam a dificuldade de classificar o sinal SP, somente 50% desta classe são classificados corretamente. Observa-se um aumento significativo na taxa de acerto da classificação de PE e PI, entretanto, ainda insatisfatório.

Tabela 9 - Tabela confusão para dados de treinamento da rede A

| | Conjunto de Treinamento Quantidade/Percentual | | |
|----------------|--|-----------|-----------|
| | SP | PE | PI |
| SP | 203/41% | 267/53% | 30/6% |
| PE | 117/23% | 367/73% | 16/3% |
| PI | 57/11% | 88/18% | 355/71% |
| ACERTOS | 925/62% | | |

Tabela 10 - Tabela confusão para dados de treinamento da rede B

| | Conjunto de Treinamento Quantidade/Percentual | | |
|----------------|--|-----------|-----------|
| | SP | PE | PI |
| SP | 240/48% | 233/47% | 27/5% |
| PE | 137/27% | 348/70% | 15/3% |
| PI | 55/11% | 93/19% | 352/70% |
| ACERTOS | 940/63% | | |

Desta forma, conclui-se que com o novo critério de classificação não foi possível alcançar melhora significativa dos resultados, sendo desnecessária a avaliação da rede com os dados de teste.

Para as saídas das classificações do item anterior, de acordo com as Figuras 21 e 22 os sinais de SP e PE estão no entorno de zero, respectivamente, ratificando a dificuldade de discriminação entre estas duas classes.

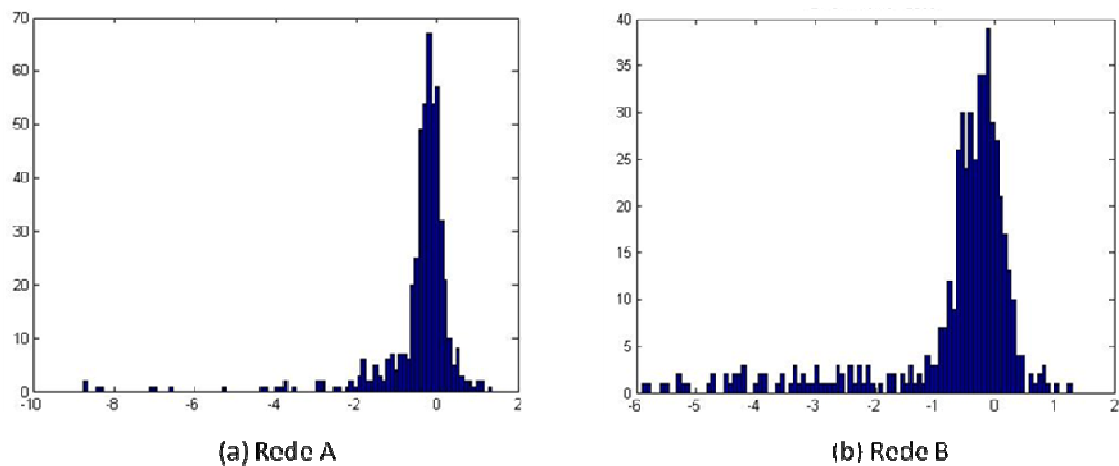


Figura 21 - Distribuição dos valores de Z1 para a classe SP em relação aos intervalos definidos.

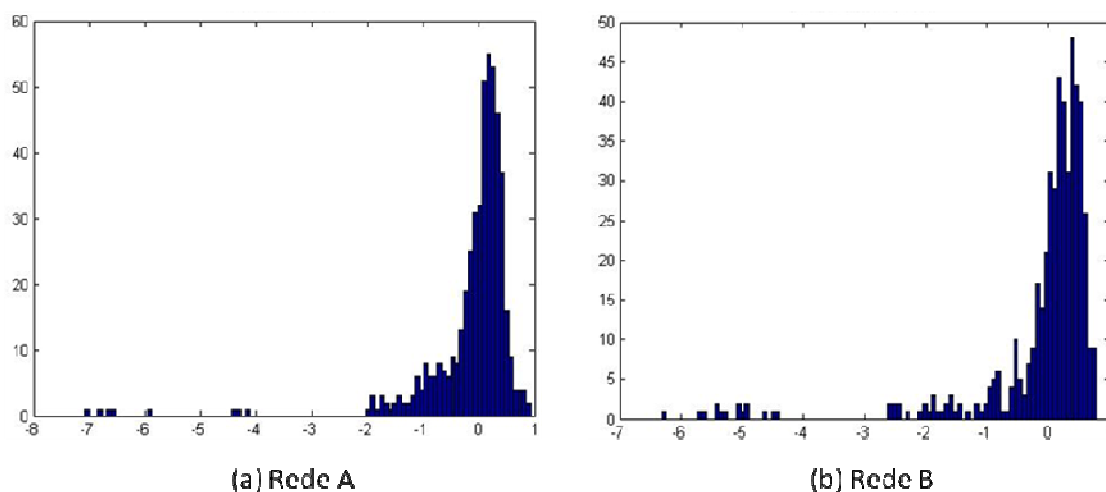
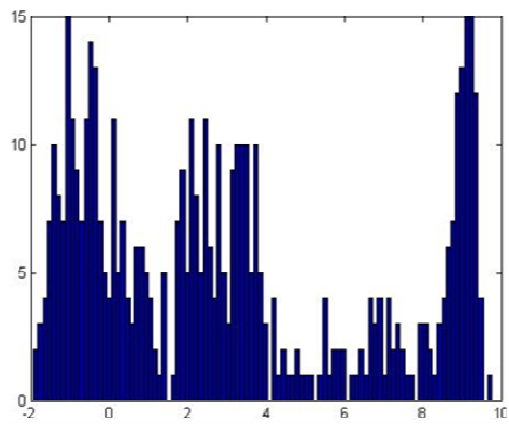
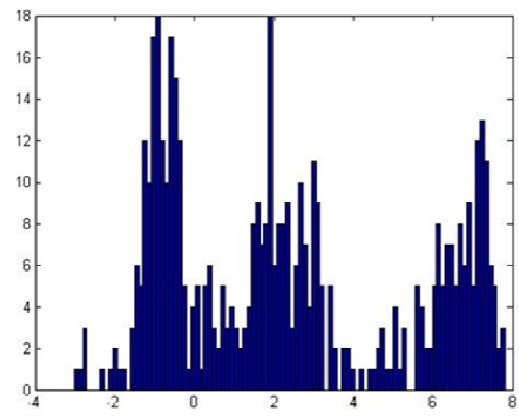


Figura 22 - Distribuição dos valores de Z2 para a classe PE em relação aos intervalos definidos.

A Figura 23 reforça os resultados apresentados pela rede treinada na seção 4.1.3. Apesar de o resultado ideal ser um único pico afastado de zero, a distribuição apresentada indica que estes sinais podem ser discriminados dos demais com índices melhores de acerto.



(a) Rede A



(b) Rede B

Figura 23 – Distribuição dos valores de Z3 para a classe PI em relação aos intervalos definidos.

4.2 Ensaio 2

Conforme descrito no Capítulo 3, o sinal coletado de EA do Ensaio 2 teve o acréscimo de 6 parâmetros (FREQ-PP1, FREQ-PP2, FREQ-PP3, FREQ-PP4, C-FRQ e P-FRQ). Neste ensaio ocorreu rompimento não brusco do corpo de prova.

Sua curva de Pressão e ToFD por tempo é apresentada na Figura 24, a partir do gráfico são definidos os intervalos de cada classe, nesta situação não foi empregado o método aplicado na seção 4.1.5, pois pelo conhecimento técnico da curva de ToFD adquirido ao longo do trabalho identifica-se com clareza o intervalo de cada classe. A classe SP (Sem Propagação) foi definida até o tempo de 6868 s (181 bar), a classe PE (Propagação Estável) entre 6869 e 8143 s (208 bar), e a classe PI (Propagação Instável) entre 8144 s e 12837 s (233 bar). Resultando em 2207 sinais de SP, 1394 sinais de PE e 6439 sinais de PI.

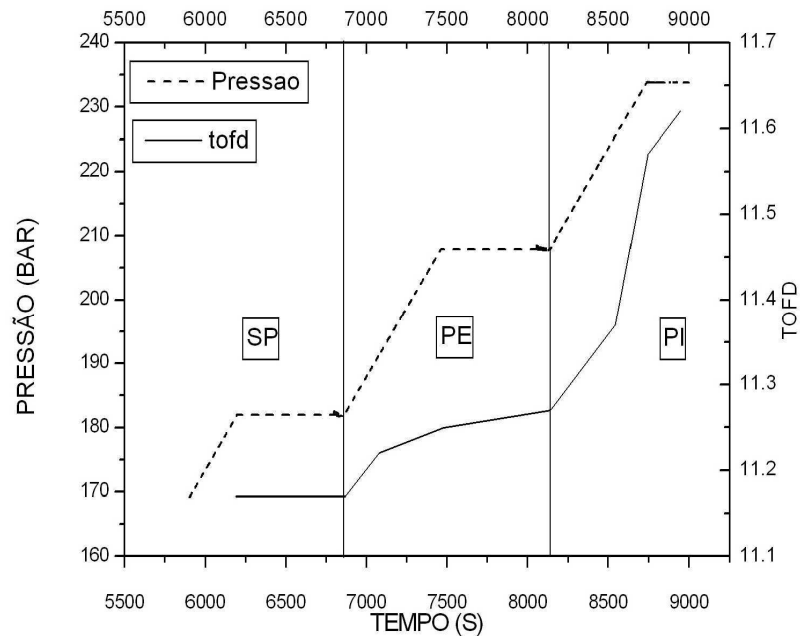


Figura 24 - Gráfico Pressão e TOFD por Tempo - Ensaio 2

Um novo estudo de configuração ótima da rede foi realizado para evitar problemas de super treinamento (*overtraining*), já que os sinais obtidos no ensaio 2 tiveram o acréscimo de novos parâmetros. De acordo com a Tabela 11, o melhor resultado para o conjunto de treino e teste foi com seis neurônios na camada intermediária, alfa de 0,05 variável e uso de momento em 0,9. Vale ressaltar que os índices de acerto são inferiores aos encontrados na seção 4.2.2, esta diferença ocorre porque no estudo de configuração o treino é ajustado para 1000 épocas, enquanto que para treinar os classificadores de três e duas classes foram utilizadas 6000 épocas.

Empregando esta configuração, foram treinadas redes para classificar duas classes, SP e P, e classificadores de três classes, SP, PE e PI. Conforme descrito nos itens a seguir.

Tabela 11 - Índice de acerto em função da variação do número de neurônios na camada intermediária da rede treinada para classificar três classes.

| Neurônios camada Intermediária | Sem momento | | Com momento | | Sem momento e Alfa variável | | Com momento e Alfa variável | |
|--------------------------------------|-------------|-------|-------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|--------------|
| | Treino | Teste | Treino | Teste | Treino | Teste | Treino | Teste |
| 1 | 61,44 | 61,65 | 61,73 | 62,05 | 68,84 | 68,87 | 69,35 | 69,57 |
| 2 | 61,00 | 60,96 | 61,06 | 60,91 | 68,96 | 68,87 | 69,31 | 69,57 |
| 3 | 64,95 | 65,14 | 60,97 | 60,96 | 68,84 | 68,78 | 69,24 | 69,62 |
| 4 | 67,41 | 67,43 | 63,48 | 63,35 | 68,89 | 68,78 | 69,27 | 69,47 |
| 5 | 67,80 | 67,58 | 64,92 | 65,14 | 68,86 | 68,82 | 69,27 | 69,47 |
| 6 | 68,01 | 67,83 | 67,11 | 67,18 | 68,86 | 68,82 | 69,27 | 69,57 |
| 7 | 68,14 | 68,02 | 67,41 | 67,38 | 68,92 | 68,82 | 69,27 | 69,57 |
| 8 | 68,18 | 68,08 | 67,69 | 67,43 | 68,86 | 68,82 | 69,27 | 69,57 |
| 9 | 68,41 | 68,33 | 67,83 | 67,63 | 68,87 | 68,82 | 69,27 | 69,57 |
| 10 | 68,51 | 68,38 | 67,95 | 67,73 | 68,93 | 68,82 | 69,26 | 69,57 |

4.2.1 Separação em Duas Classes

Analisando o gráfico da Figura 25 a seguir, os sinais foram separados na classe SP (Sem Propagação) até o tempo de 6868 s (181 bar) e classe P (Propagação) entre 6869 s e 12837 s (233 bar). Resultando em 2207 sinais de SP e 7834 de P.

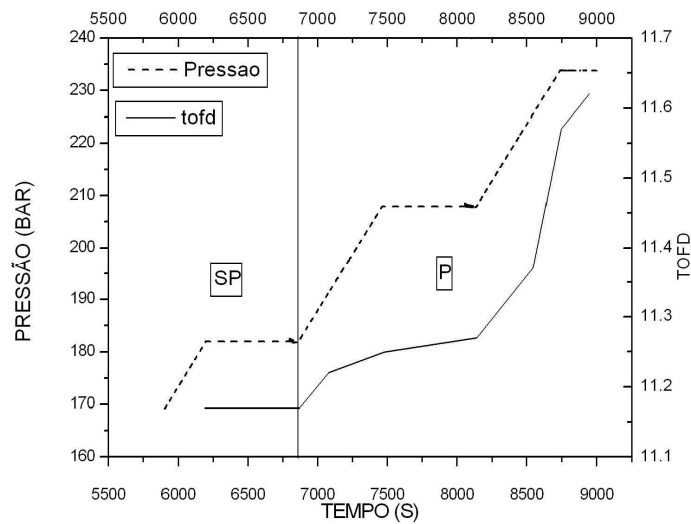


Figura 25 - Pressão e ToFD por Pressão

Foram sorteados aleatoriamente 10 pares de conjunto de treinamento e teste (80% para treino e 20% para teste), na mesma metodologia já apresentada, as tabelas de confusão de cada par de conjunto com a quantidade de acerto e percentuais são apresentadas no Apêndice A.

A Tabela 12 a seguir apresenta os valores de média de acerto em quantidade e percentual referentes aos 10 conjuntos sorteados de treinamento e teste. A Tabela 13 apresenta os desvios padrões da média.

Tabela 12 - Resultado da média de acerto para os 10 conjuntos de treino e teste (duas classes)

| Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|---|----------|----------|---|---------|----------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 1293/73% | 469/27% | SP | 333/75% | 108/25% |
| P | 336/5% | 5934/95% | P | 186/12% | 1378/88% |
| ACERTO | 7227/90% | | 1711/85% | | |

Na Tabela 12, os valores de acerto de treinamento são compatíveis com o esperado para discriminação de duas classes, já que no ensaio 1 ficou evidente que a classe PI é bem definida e dificuldade está em separar SP de PE. O mesmo ocorrendo com os sinais usados para testar os classificadores, a pouca diferença entre a média de acerto de treinamento e teste comprova a generalização do classificador.

A Tabela 13 apresenta os valores de desvio padrão entre as dez redes treinadas, mostrando que os conjuntos de teste apresentam bastante dispersão, porém, os desvios de acerto geral são admissíveis se considerando a quantidade de sinais em cada conjunto de teste.

Tabela 13 – Resultados do desvio padrão da média de acerto para os 10 conjuntos de treino e teste (duas classes). STD – Desvio padrão da média geral de acerto.

| Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|---|---------|---------|---|---------|---------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 19/1% | 22/1% | SP | 39/9% | 42/9% |
| P | 20/0,3% | 24/0,3% | P | 188/12% | 194/12% |
| STD | 18/0,2% | | 180/9% | | |

4.2.2 Separação com Três classes

Para situação de classificação com três classes, a separação foi feita conforme descrito na seção 4.2. Inicialmente, foram feitos testes com o sistema de classificação considerando apenas o único valor positivo na saída dos neurônios, isto é, o que se denomina **Sem Reclassificação** e em seguida procedeu-se com o teste denominado **Com Reclassificação**[2,11]

4.2.2.1 Sem reclassificação

Pela Tabela 14 de confusão a seguir, a acurácia de acerto com três classes **Sem Reclassificação** atinge 74% para os conjuntos de treinamento e 71% com os conjuntos de teste, comprovando a generalização dos classificadores não lineares. Há de se destacar que a configuração da rede neural foi a mesma em todas as situação, conforme explanado anteriormente. Estes valores, comparados aos encontrados no Ensaio anterior (atingiram pouco mais 50% de acerto geral), na mesma condição, são significativamente maiores, atestando que a inclusão dos quatro parâmetros de frequência (FRQPP1, FRQPP2, FRQPP3 e FRQPP4) influenciou neste aumento relevante de acerto. Este fato indica que estes parâmetros são fundamentais na aquisição dos sinais e não devem ser descartados.

Analisando-se separadamente os índices médios de acerto pra cada uma das três classes agora estudadas, a classe PI é a que tem a melhor acurácia de classificação (91%), o que era esperado, pois fenomenologicamente é quando há o crescimento instável do defeito e os eventos de emissão acústica se tornam mais perceptíveis no sistema de aquisição. A classe PE confunde com SP e também com PI, o que prova que constatar o exato momento de transição do estado de não propagação do defeito para o estado de uma propagação elástica, estável, assim como a transição do regime elástico para o plástico é consideravelmente mais complexa. Os valores de Não Classificação (mais de uma saída

positiva ou todas negativas) estão dentro do esperado no que normalmente acontece em reconhecimento de padrão.

Tabela 14 - Tabela de Confusão média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação)

| | Acertos (Conj. de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conj. de teste) Quantidade/Percentual | | | |
|----------------|---|---------|----------|---------|-----------|---|---------|----------|---------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1075/83% | 51/4% | 175/13% | 957/12% | SP | 273/82% | 15/4% | 47/14% | 244/12% |
| PE | 121/16% | 584/77% | 53/7% | | PE | 29/15% | 151/77% | 17/8% | |
| PI | 200/4% | 190/4% | 4627/92% | | PI | 53/4% | 50/4% | 1129/92% | |
| acertos | 6286/78% | | | | | 1553/77% | | | |

As tabelas de confusão para cada par de conjuntos formado se encontram no Apêndice B.

Na análise dos desvios padrões (Tabela 15), constata-se que os valores são pequenos, não havendo muita dispersão dos percentuais de acerto entre os 10 pares de conjuntos sorteados.

Tabela 15 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado. STD – Desvio padrão da média geral de acerto.

| | Acertos (Conj. de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conj. de teste) Quantidade/Percentual | | | |
|------------|---|---------|---------|-------|-----------|---|--------|---------|-------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 52/3% | 29/2,1% | 19/1,6% | 79/1% | SP | 12/3% | 9/3% | 9/3% | 29/1% |
| PE | 6/0,9% | 36/1,4% | 10/1,3% | | PE | 3/2% | 16/2% | 6/2% | |
| PI | 19/0,4% | 9/0,2% | 38/0,4% | | PI | 8/0,6% | 7/0,5% | 20/0,8% | |
| STD | 66/0,82% | | | | | 25/1% | | | |

4.2.2.2 Com reclassificação

O próximo passo nos testes foi avaliar a classificação dos mesmos pares de conjuntos formados no item anterior no sistema de **Reclassificação**. Nesta metodologia, lembrando, o neurônio que indica a classe é o de maior valor, apontando a maior probabilidade de que um sinal pertença a essa classe.

A Tabela 16 de confusão apresenta os resultados obtidos nesta classificação. As acurácias de treinamento e teste aumentaram em relação à situação anterior, como era de se esperar. Em treinamento a média chegou a 85%, e nos testes, 84%, 7% a mais que para **Sem Reclassificação**. O resultado final indica cerca de 30% a mais de acerto para sinais usados em teste em ao ensaio 1. Não se tem notícia de resultados similares realizados por outros pesquisadores no Brasil e no mundo, ratificando a importância dos testes feitos.

Esta tabela de confusão também indica que apesar de menor o índice de acerto quando comparado com a classe PI, as classes SP e PE conseguiram ser discriminadas.

A Tabela 17 apresenta os valores de desvio padrão entre classes e geral, apresentando valores compatíveis com os da Tabela 15.

Tabela 16 - Tabela de Confusão da média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| | Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|--------|---|------------|-------------|-------------|---|------------|-------------|
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1345/76,67% | 175/9,95% | 235/13,37% | SP | 345/76,12% | 48/10,60% | 60/13,28% |
| PE | 197/17,76% | 818/73,76% | 94/8,48% | PE | 46/15,99% | 211/74,12% | 28/9,89% |
| PI | 266/5,14% | 224/4,34% | 4679/90,52% | PI | 70/5,49% | 59/4,68% | 1141/89,84% |
| ACERTO | 6842/85,18% | | | 1697/84,15% | | | |

Tabela 17 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes com reclassificação). STD – Desvio padrão da média geral de acerto.

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|------------|---|---------|---------|-----------|---|--------|---------|
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 57/3% | 47/3% | 18/1% | SP | 16/4% | 15/3% | 10/2% |
| PE | 24/2% | 25/1% | 17/2% | PE | 7/3% | 18/2% | 6/1% |
| PI | 14/0,3% | 10/0,2% | 41/0,4% | PI | 9/0,6% | 6/0,5% | 17/0,6% |
| STD | 45/0,6% | | | | 19/0,9% | | |

As tabelas de confusão para cada par de conjuntos formado se encontram no Apêndice C.

4.3 Ensaio 3

Neste ensaio, foram coletados os mesmo parâmetros de emissão acústica, do ensaio 2, portanto seguiu-se com a mesma configuração ótima de treinamento das redes neurais – seis neurônios na camada intermediária, alfa variável com início em 0,05, incremento de 1,05, decréscimo de 0,9 e sem uso de momento igual a 0,9. Vale destacar que neste ensaio houve rompimento brusco do corpo de prova.

4.3.1 Separação em Duas Classes

Analisando o gráfico da Figura 26 a seguir, para uma situação de duas classes, os sinais foram separados na classe SP (Sem Propagação) até o tempo de 6740 s e classe P (Propagação) a partir de 6741 s, resultando em 18908 sinais de SP e 810 de P.

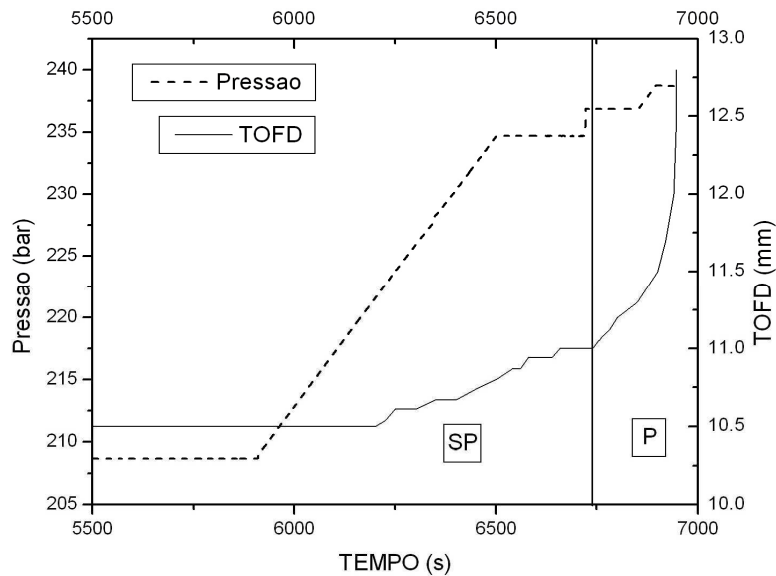


Figura 26 - Pressão e ToFD por Tempo - separação em 2 classes

Foram sorteados aleatoriamente 10 pares de conjunto de treinamento e teste (80% para treino e 20% para teste), na mesma metodologia de sorteio e formação de conjuntos já utilizadas. As tabelas de confusão com a quantidade de acerto e percentuais de cada rede treinada são apresentadas no Apêndice D.

A Tabela 18 a seguir apresenta os valores de média de acerto em quantidade e percentual referentes aos 10 conjuntos sorteados de treinamento e teste. A Tabela 19 apresenta os desvios padrões.

Tabela 18 - Tabela de Confusão da média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (duas classes com reclassificação).

| Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|---|-----------|---------|---|----------|---------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14909/99% | 222/1% | SP | 3721/99% | 55/1% |
| P | 17/3% | 628/97% | P | 5/3% | 161/97% |
| ACERTO | 15536/98% | | 3883/98% | | |

Na Tabela 18, constatam-se excelentes resultados de acurácia de classificação para os sinais de treinamento e teste com valores praticamente iguais, fato que comprova a generalização do classificador não linear. A provável causa pra estes resultados está no fato dos sinais de EA serem evidenciados no crescimento rápido da trinca até o rompimento catastrófico, diferente dos ensaios 1 e 2.

A melhora significativa dos resultados é devida também ao novo critério de separação empregado na separação das classes. Conforme descrito no gráfico da figura 26 na classe SP foram incluídos os sinais provenientes do crescimento lento da trinca e para a classe P os sinais oriundos do crescimento acentuado da trinca.

Tabela 19 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (duas classes com reclassificação)

| Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|---|----------|----------|---|----------|----------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 12/0,12% | 18/0,12% | SP | 20/0,28% | 10/0,28% |
| P | 3/0,51% | 9/0,51% | P | 2/1,26% | 12/1,26% |
| STD | 16/0,09% | | 11/0,27% | | |

A Tabela 19 apresenta os valores de desvio padrão, mostrando que tanto para a classe SP, quanto para classe P, os valores são pequenos, não havendo muita dispersão dos percentuais de acerto entre os 10 pares de conjuntos sorteados.

O melhor resultado foi obtido no Ensaio 3, onde assim como no ensaio apresentado por Silva [1], houve rompimento brusco do corpo de prova. Porém, naquela situação, a trinca não tinha formato elíptico e a fratura foi catastrófica, demonstrando a relevância dos resultados apresentados.

4.3.2 Separação com Três classes

Para situação de classificação com três classes, analisando a figura 27, os sinais foram separados na classe SP até o tempo de 6200s, na classe PE entre 6201 até 6740s e na classe PI a partir de 6741s, resultando em 16072 sinais de SP, 2836 sinais de PE e 810 sinais de PI.

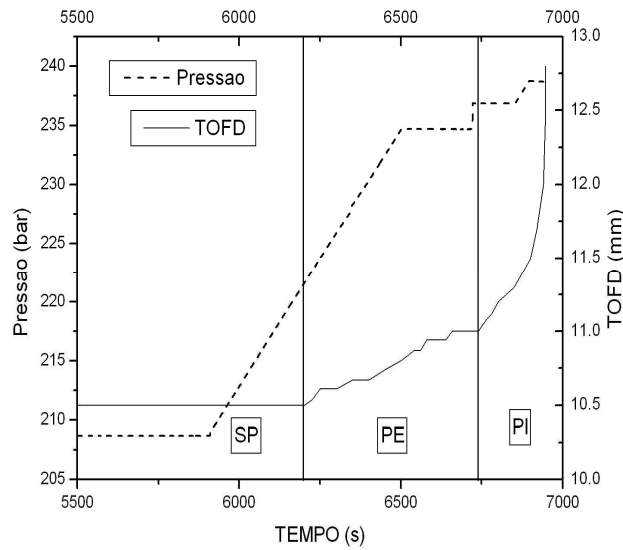


Figura 27 - Pressão e ToFD por Tempo - separação em 3 classes

4.3.2.1 Sem reclassificação

Pela Tabela 20, a acurácia de acerto com três classes **Sem Reclassificação** atinge cerca de 86% para os conjuntos de treinamento e teste, comprovando a generalização dos classificadores não lineares. Há de se destacar que a configuração da rede neural foi a mesma em todas as situações, conforme explanado anteriormente. Estes valores, comparados aos encontrados nos ensaios anteriores, na mesma condição, chegam a ser cerca de 10% acima de acurácia. Uma provável explicação para índice maior de acerto está no fato de ter acontecido um crescimento do defeito de forma rápida até o vazamento do corpo de prova, aumentando claramente o acerto da classe PI. Além disso, as classes SP e PI apresentaram médias de acerto bem maiores que no ensaio anterior, ao contrário de PE que teve uma redução significativa, havendo muita confusão dessa classe com SP, este resultado mostra que a condição final do ensaio, isto é, o rompimento catastrófico ou não do duto, influencia na qualidade dos sinais de EA. No caso para três classes, o rompimento catastrófico prejudica a discriminação de PE. A quantidade de sinais não classificados é muito pequena tanto para treino como para teste, apenas 0,25%.

Tabela 20 – Tabela de Confusão média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado.

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | | |
|----------------|---|----------|---------|----------|-----------|-------------|---|---------|----------|----|
| | SP | PE | PI | NC | | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 11650/99,8% | 16/0,14% | 1/0,01% | 39/0,25% | SP | 2916/99,71% | 8/0,28% | 0/0,01% | 10/0,25% | |
| PE | 1695/83% | 123/6% | 233/11% | | PE | 411/81% | 34/7% | 60/12% | | |
| PI | 0/0,02% | 13/2% | 578/98% | | PI | 0/0% | 2/2% | 144/98% | | |
| ACERTOS | 12351/86% | | | | | 3094/86% | | | | |

As tabelas de confusão para cada par de conjuntos formado se encontram no Apêndice E.

Na análise dos desvios padrões (Tabela 21), constata-se que os valores são pequenos, não havendo muita dispersão dos percentuais de acerto entre os 10 pares de conjuntos sorteados.

Tabela 21 – Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado. STD – Desvio padrão da média geral de acerto.

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | | |
|------------|---|---------|------------|------------|-----------|---------|---|---------|--------|----|
| | SP | PE | PI | NC | | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 16/0,04% | 5/0,04% | 1/0,01% | 15,38/0,1% | SP | 15/0,2% | 5/0,2% | 1/0,02% | 8/0,2% | |
| PE | 16/0,7% | 15/0,7% | 12/0,5% | | PE | 16/2% | 9/2% | 10/2% | | |
| PI | 0/0% | 1/0,2% | 11,72/0,2% | | PI | 0/0% | 1/0,6% | 12/0,6% | | |
| STD | 23/0,1% | | | | | 11/0,3% | | | | |

4.3.2.2 Com reclassificação

O próximo passo nos testes foi avaliar a classificação dos mesmos pares de conjuntos formados no item anterior no sistema de **Reclassificação**. A Tabela 22 apresenta os

resultados obtidos nesta classificação. As acurácias de treinamento e teste aumentaram em relação à situação anterior, porém, de forma insignificante, menos de 1%.

Tabela 22 - Tabela de Confusão média para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes com reclassificação). NC – não classificado.

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|----------------|---|----------|---------|-----------|---|---------|---------|
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12824/99,80% | 24/0,19% | 1/0,01% | SP | 3211/99,6% | 12/0,4% | 0/0% |
| PE | 1871/83% | 146/6% | 250/11% | PE | 454/81% | 40/7% | 66/12% |
| PI | 0/0% | 13/2% | 637/98% | PI | 0/0% | 3/2% | 158/98% |
| ACERTOS | 13607/86% | | | | 3409/86% | | |

Esta tabela de confusão também indica que as classes que mais se confundem são PE com SP e PI, ratificando os resultados apresentados até o presente momento.

A Tabela 23 apresenta os valores de desvio padrão da média entre classes e geral, apresentando valores compatíveis os da Tabela 21.

Tabela 23 - Tabela de Confusão do desvio padrão para os 10 conjuntos de treinamento e teste (três classes sem reclassificação). NC – não classificado. STD – Desvio padrão da média geral de acerto.

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|------------|---|---------|---------|-----------|---|--------|---------|
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 15/0,02% | 4/0,03% | 2/0,01% | SP | 14/0,2% | 6/0,2% | 1/0,02% |
| PE | 18/1,4% | 14/0,6% | 32/1,3% | PE | 16/2% | 9/2% | 11/2% |
| PI | 0/0,05% | 2/0,2% | 11/0,2% | PI | 0/0% | 1/0,6% | 12/0,6% |
| STD | 19/0,2% | | | | 12/0,3% | | |

As tabelas de confusão para cada par de conjuntos formado se encontram no Apêndice F.

A separação entre SP e PE é bem mais complexa que SP e PI, assim como entre PE e PI. Contudo, a acurácia de cerca de 86% de acerto com sinais de teste é um resultado expressivo e aceitável para a aplicação do classificador utilizando os parâmetros dos sinais disponíveis no programa de aquisição, apesar das discrepâncias de resultados entre o Ensaio 2 e o 3. Onde pela análise das tabelas de confusão da média de acerto pôde-se observar que apenas no Ensaio 2 o classificador conseguiu discriminar corretamente os sinais de PE.

4.4 Estudo da Relevância das Entradas

O aumento dos índices de acerto na classificação comprovou que os parâmetros acrescidos são fundamentais para o bom desempenho do classificador, contudo uma investigação mais detalhada de cada parâmetro se faz necessária. Para isso, se utilizou o quarto conjunto de pares de entrada e saída de treinamento sorteados dos sinais do Ensaio 2 e a rede já treinada a partir destes pares.

O gráfico da Figura 28 mostra que o AMP e ASL influenciam apenas na classificação de SP e PI, enquanto que o I-Freq e o C-Freq, são fundamentais para a discriminação de PE, assim como Freq-PP3. O parâmetro I-Freq contribuiu para a identificação de SP e PE, enquanto que FreqPP1 e Freq PP2 para as três classes. Os demais parâmetros contribuem pouco para a discriminação entre as classes.

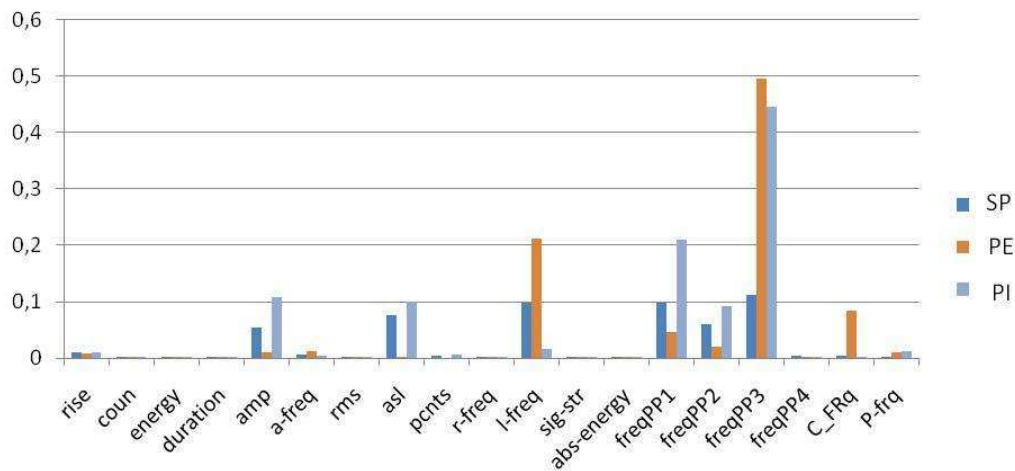


Figura 28 - Gráfico da relevância de cada parâmetro para cada uma das três classes

O gráfico da Figura 29, mostra que o parâmetro de maior relevância é o Freq-PP3, depois o Freq-PP1 e o I-Freq com uma relevância em torno de 30. O AMP, ASL e o Freq-PP2 apresentam relevância um pouco abaixo de 20 e o C-Freq entre 5 e 10. O demais parâmetros apresentaram valores abaixo de 5, indicando pouca ou nenhuma influência na classificação.

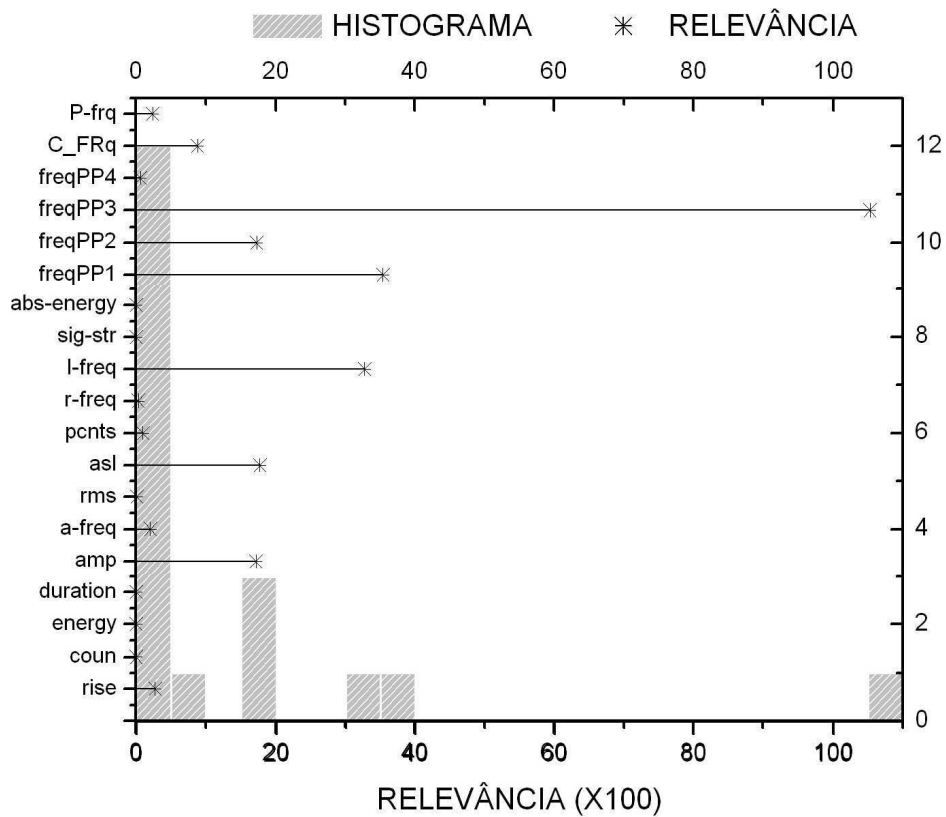


Figura 29 - Em cinza o histograma das relevâncias para as três classes juntas. As estrelas indicam a relevância de cada parâmetro para as três classes juntas.

Para confirmar a influência de cada parâmetro na discriminação das classes, a partir da Figura 29, criaram-se cinco conjuntos com os pares de entrada e saída. Quanto mais no interior, maior a relevância, conforme descrito na Figura 30.

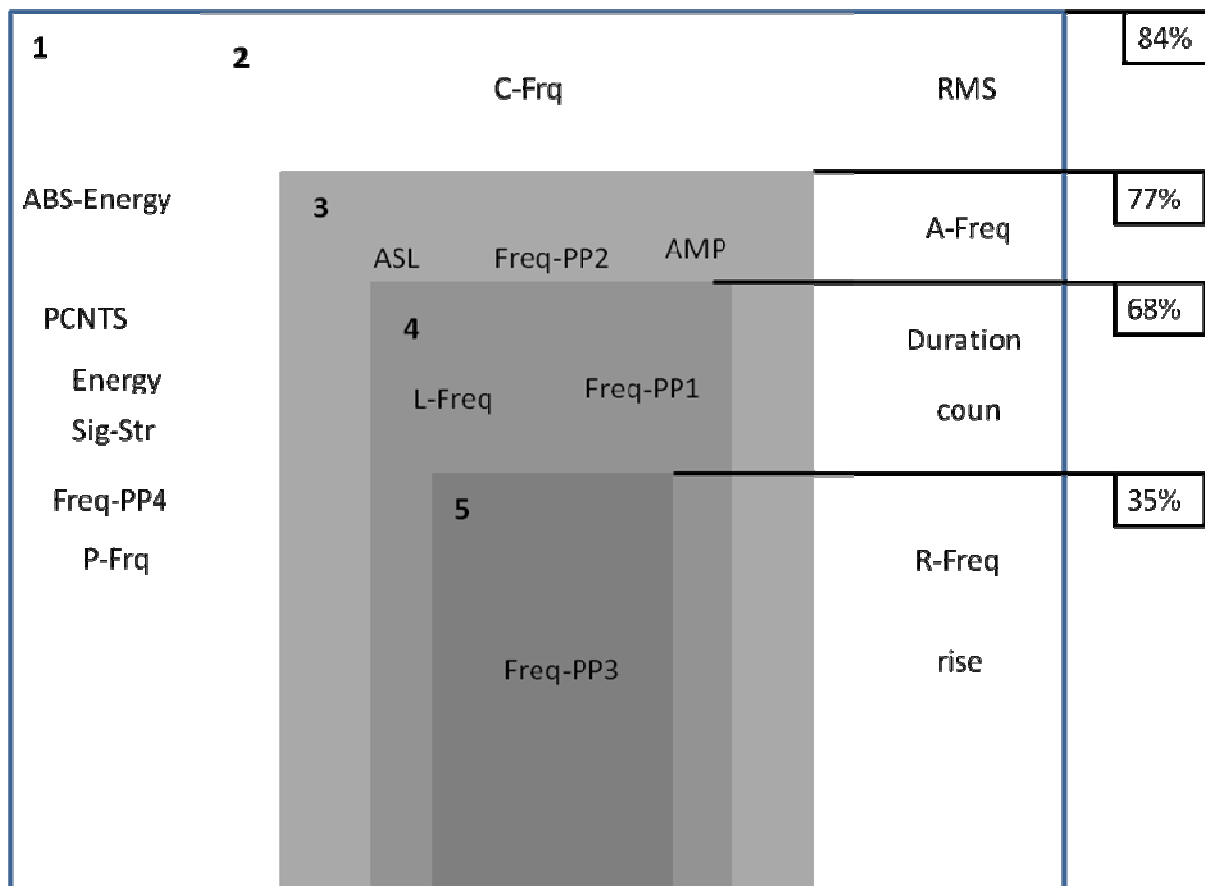


Figura 30 - Separação de conjuntos pela relevância. À direita o percentual de acerto na classificação de cada conjunto.

O conjunto de entrada é formado da seguinte forma, o valor do parâmetro contido no conjunto é mantido inalterado e os não contidos no conjunto são substituídos pelo seu valor médio. Por exemplo, no conjunto 5 os valores de Freq-PP3 se mantêm enquanto que os demais parâmetros são substituídos pela média. Depois de formado, o conjunto é aplicado ao classificador.

A Figura 30 indica que a taxa de acerto entre o conjunto 1 e o conjunto 2, foram iguais, confirmando que os parâmetros com relevância inferior a 5 não influenciam na classificação. A eliminação de C-Freq, reduziu o acerto em 7%. O conjunto 4 alcançou quase de 70% de acerto, usando apenas 3 parâmetros, e o conjunto 5 35%, com apenas 1 parâmetro. Este resultado confirma, o indicado pela Figura 29, que os parâmetros com relevância menor que 5 não influenciam na classificação.

Com objetivo de corroborar os resultados apresentados, uma nova rede foi treinada utilizando os mesmos pares de entrada e saída já utilizados neste item. Contudo a entrada contém apenas os parâmetros do conjunto 2 da Figura 30, isto é, apenas os sete mais relevantes. A configuração da rede foi a mesma utilizada no ensaio 2.

As Tabelas 24 e 25 apresentam os resultados obtidos na classificação com a rede treinada com todos os parâmetros de entrada e a classificação com a rede treinada com os sete parâmetros mais relevantes (C-Freq, ASL, AMP, I-Freq, Freq-PP1, Freq-PP2, Freq-PP3), respectivamente.

Tabela 24 - Tabela confusão da rede treinada com todos os 19 parâmetros de entrada.

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|---------|---|---------|----------|----------|---|---------|----------|
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1331/75% | 210/12% | 228/13% | SP | 333/76% | 56/13% | 49/11% |
| PE | 203/18% | 817/74% | 91/8% | PE | 40/14% | 217/77% | 26/9% |
| PI | 279/5% | 235/5% | 4638/90% | PI | 71/6% | 52/4% | 1164/90% |
| ACERTOS | 6786/84% | | | 1714/85% | | | |

Tabela 25 - Tabela confusão da rede treinada com os 7 parâmetros mais relevantes(C-Freq, ASL, AMP, I-Freq,Freq-PP1, Freq-PP2, Freq-PP3).

| | Conjuntos de treinamento Quantidade/Percentual | | | | Conjuntos de teste Quantidade/Percentual | | |
|----------------|---|---------|----------|-----------|---|---------|----------|
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 979/55% | 418/24% | 372/21% | SP | 301/69% | 63/14% | 74/17% |
| PE | 122/11% | 818/74% | 171/15% | PE | 44/16% | 190/67% | 49/17% |
| PI | 219/4% | 185/4% | 4748/92% | PI | 48/4% | 42/3% | 1197/93% |
| ACERTOS | 6545/81% | | | | 1688/84% | | |

A rede treinada com os sete parâmetros mais relevantes alcançou um desempenho muito próximo da rede treinada com todos os parâmetros, apresentando uma redução de 3% na classificação correta no conjunto de treinamento e de apenas 1% no conjunto de teste. Entretanto, como não há custos relevantes de tempo de processamento computacional, trabalho de aquisição e financeiro na utilização de todos os dezenove parâmetros, há de se mantê-los nos conjuntos de sinais para treinamento e teste dos classificadores. Pois , não compensa a diminuição da taxa de acerto, embora que pequena.

5 Conclusões

A partir do desenvolvimento e estudo de classificadores de padrões de propagação de defeitos em dutos pressurizados por técnicas de emissão acústica implementados por redes neurais, chegou-se às seguintes conclusões principais.

Na classificação de duas classes, SP e P, o classificador mostrou-se eficiente na separação das classes. Observando que a classe SP deve conter os sinais em que a fratura se mantém constante e com crescimento lento, deixando a classe P apenas com os sinais com crescimento acentuado. Concluindo, a separação entre SP e P quando se utilizam os dezenove parâmetros e quando há rompimento do corpo de prova é a situação confiável para ser aplicada em campo.

Para classificação com três classes de sinais, ficou comprovado que apesar da dificuldade de separação da classe PE, a acurácia (média de acerto com os sinais utilizados para testar o classificador) alcançada no Ensaio 2 de cerca de 85% de acerto e separação clara das três classes com sinais de teste é um resultado expressivo e aceitável para a aplicação do classificador e demonstra a importância de utilizar os 19 parâmetros disponíveis no programa de aquisição. A natureza do ensaio no momento da coleta dos sinais é um fator relevante na discriminação da classe PE, já que diferente do Ensaio 2, no Ensaio 3 houve rompimento brusco do corpo de prova.

O estudo de relevância dos parâmetros de EA revelou que a maior parte dos parâmetros coletados não influencia na classificação, determinando que com apenas 7 (C-Freq, ASL, Freq-PP2, AMP, I-Freq, Freq-PP1 e Freq-PP3) dos dezenove parâmetros obtêm-se o mesmo índice de acerto. É importante destacar que dos sete parâmetros mais relevantes cinco (Freq-PP1, Freq-PP2, Freq-PP3, C-Freq e I-Freq) são os que foram incluídos a

partir do Ensaio 2, explicando a melhora significativa alcançada a partir do segundo ensaio.

Numa conclusão geral, os resultados apresentados neste trabalho são inovadores e promissores para a continuação dos trabalhos no sentido de identificação automática de propagação de defeitos em dutos rígidos pressurizados e monitorados pelo ensaio de Emissão Acústica. Provam que é possível a classificação das três classes de sinais com o intuito de separar o momento de propagação estável do instável.

6 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se estudar e viabilizar de formação de novos parâmetros característicos dos sinais, seja por combinação dos atuais em alguma forma de cálculo, ou através da análise da forma de onda dos sinais adquiridos. Pode-se também avaliar um novo critério de separação das três classes, como taxa de crescimento da deformação. Outra sugestão é a utilização de técnicas de processamento de sinais, para separar os sinais referentes à propagação do defeito dos demais sinais de outras fontes existentes no corpo de prova durante o ensaio hidrostático.

7 Publicação dos Resultados

Os resultados deste trabalho são novos e promissores quando comparados às publicações anteriores citadas no texto, motivando às seguintes submissões de trabalhos:

- 1) **Uso de Redes Neurais Artificiais na Detecção de Propagação de Defeitos em Dutos Rígidos** – Aprovado para publicação na 11ª COTEQ - Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Maio 2011, Recife,.
- 2) New Approach in Automatic Detection of Defects Propagation in Pipelines – Resumo submetido a 5ª Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos (V COPAEND), Outubro 2011, Cancun, México.
- 3) Um artigo será submetido à revista ISI NDT&E International.

8 Referências Bibliográficas

[1] DA SILVA ,R.R., SOARES, S.D., CALÔBA, L.P., SIQUEIRA , M.H.S., and REBELLO, J.M.A., “Detection of the propagation of defects in pressurised pipes by means of the acoustic emission technique using artificial neural networks”. *Insight*, v. 48, No 1, pp. 45-41, 2006.

[2] DA SILVA ,R.R., CALÔBA, L.P., SIQUEIRA, M.H.S., SAGRILO, L.V.S. and REBELLO, J.M.A., “Evaluation of the relevant characteristic parameters of welding defects and probability of correct classification using linear classifiers”. *Insight*, v. 44, No 10, pp. 616-622, 2002.

[3] MIX, P.E., “Introduction to nondestructive testing: a training guide”, 2nd ed., John & Sons, Inc., 2005.

[4] VALLEN, H., “AE Testing Fundamentals, Equipment, Applications” , Vallen-Systeme Gmb Hicking (Munich), Germany., *NDT*, No.09, v.7, 2002.

[5] SOARES, S.D., “Emissão Acústica”, Anotações Técnicas

[6] SOARES, S.D., 2008, **Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de mecânica da fratura na avaliação da integridade de equipamentos pressurizados**, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,Brasil.

[7] Haykin, S., 1931 – *Neural networks: a comprehensive foundation* – 2nd ed – Pretintice-Hall, 1999.

[8] SEIXAS, J.M., CALÔBA, L.P., DELPINO, I., “Relevance Criteria for Variance Selection in Classifier Designs”. In: *International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*, pp.451-454, 1996.

[9] DIAMANTIDIS, N.A., KARLIS, D., GIAKOUMAKIS, E.A., “Unsupervised Stratification of Cross-Validation for Accuracy Estimation”, *Artificial Intelligence*, v.116, pp. 1-16, 2000.

[10] DA SILVA ,R.R.,2003, **Reconhecimento de Padrões de Defeitos de Soldagem em Radiografias Industriais**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro,Brasil.

[11] DA SILVA ,R.R., MERY, D., SOARES, S.D., “Evaluation of Acoustic Emission Signal Parameters for Identifying the Propagation of Defects in Pressurized Tubes”. In: *IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires*, 2007.

APÊNDICE

APÊNDICE A (ENSAIO 2)

Tabelas de Confusão pra Duas Classes

Tabela 1 - Resultados de acerto para o primeiro conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|------------------------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | Quantidade/Percentual | | |
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 918/52,64% | 826/47,36% | SP | 211/45,67% | 251/54,33% |
| P | 226/3,59% | 6062/96,41% | P | 39/2,52% | 1507/97,48% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6980/86,90% | | 1718/85,56% | | |

Tabela 2 - Resultados de acerto para o segundo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|------------------------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | Quantidade/Percentual | | |
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 926/52,38% | 842/47,62% | SP | 144/32,88% | 294/67,12% |
| P | 244/3,90% | 6020/96,10% | P | 44/2,80% | 1526/97,20% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6946/86,48% | | 1670/83,17% | | |

Tabela 3: Resultados de acerto para o terceiro conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 923/52,41% | 838/47,59% | | 373/83,82% | 72/16,18% |
| P | 243/3,87% | 6028/96,13% | | 295/18,87% | 1268/81,13% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6951/86,54% | | | 1641/81,72% | |

Tabela 4: Resultados de acerto para o quarto conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 905/51,80% | 842/48,20% | | 384/83,66% | 75/16,34% |
| P | 222/3,53% | 6063/96,47% | | 342/22,08% | 1207/77,92% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6968/86,75% | | | 1591/79,23% | |

Tabela 5: Resultados de acerto para o quinto conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 904/51,66% | 846/48,34% | | 347/76,10% | 109/23,90% |
| P | 228/3,63% | 6054/96,37% | | 334/21,52% | 1218/78,48% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6958/86,63% | | | 1565/77,94% | |

Tabela 6: Resultados de acerto para o sexto conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|------------|-------------|
| | SP | P | | SP | P | |
| SP | 923/51,80% | 859/48,20% | | SP | 258/60,85% | 166/39,15% |
| P | 216/3,46% | 6034/96,54% | | P | 87/5,49% | 1497/94,51% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6957/86,62% | | | 1755/87,40% | | |

Tabela 7: Resultados de acerto para o sétimo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|------------|-------------|
| | SP | P | | SP | P | |
| SP | 954/53,54% | 828/46,46% | | SP | 247/58,25% | 177/41,75% |
| P | 259/4,14% | 5991/95,86% | | P | 90/5,68% | 1494/94,32% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6945/86,47% | | | 1741/86,70% | | |

Tabela 8: Resultados de acerto para o oitavo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|-----------|-------------|
| | SP | P | | SP | P | |
| SP | 888/50,57% | 868/49,43% | | SP | 99/22,00% | 351/78,00% |
| P | 222/3,54% | 6054/96,45% | | P | 27/1,73% | 1531/98,27% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6942/86,43% | | | 1630/81,18% | | |

Tabela 9: Resultados de acerto para o nono conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 933/52,65% | 839/47,35% | SP | 204/47,00% | 230/53,00% |
| P | 240/3,83% | 6020/96,71% | P | 50/3,18% | 1524/96,82% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6953/86,57% | | | 1728/86,06% | |

Tabela 10: Resultados de acerto para o décimo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|-------------|-------------|---|-------------|-------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 921/52,21% | 843/47,79% | SP | 345/78,05% | 97/21,95% |
| P | 245/3,91% | 6023/96,09% | P | 164/10,47% | 1402/89,53% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6944/86,45% | | | 1747/87,00% | |

APÊNDICE B (ENSAIO 2)

Tabelas de Confusão pra Três Classes Sem Reclassificação

Tabela 11: Resultados de acerto para o primeiro conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|----------------|------------------------------|-------------|------------|-------------|------------|--|
| Quantidade/Percentual | | | | | Quantidade/Percentual | | | | | |
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC | |
| SP | 1127/83,42% | 35/2,59% | 189/13,99% | 881/ 10,97% | SP | 277/80,06% | 19/5,49% | 50/14,45% | 211/10,52% | |
| PE | 117/15,14% | 602/77,88% | 54/6,99% | | PE | 33/16,58% | 146/73,37% | 20/10,05% | | |
| PI | 192/3,82% | 197/3,92% | 4638/92,26% | | PI | 61/4,88% | 55/4,40% | 1134/90,72% | | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6237/79,27% | | | | | 1557/77,62% | | | | |

Tabela 12: Resultados de acerto para o segundo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|----------------|------------------------------|-------------|------------|-------------|------------|--|
| Quantidade/Percentual | | | | | Quantidade/Percentual | | | | | |
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC | |
| SP | 1029/78,43% | 76/5,79% | 207/15,78% | 947/ 11,79% | SP | 275/77,68% | 27/7,63% | 52/14,69% | 235/11,70% | |
| PE | 112/15,32% | 551/75,38% | 68/9,30% | | PE | 27/11,84% | 171/75,00% | 30/13,16% | | |
| PI | 168/3,33% | 185/3,67% | 4689/93,00% | | PI | 39/3,27% | 49/4,11% | 1103/92,61% | | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6269/78,05% | | | | | 1549/77,14% | | | | |

Tabela 13: Resultados de acerto para o terceiro conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|-------------|------------|-------------|-----------------|---|------------|------------|-------------|------------|
| | SP | PE | P | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1055/85,43% | 27/2,19% | 153/12,39% | 1058 /13,17% | SP | 260/83,33% | 6/1,92% | 46/14,74% | 297/14,79% |
| PE | 121/16,18% | 588/78,61% | 39/5,21% | | PE | 24/13,95% | 138/80,23% | 10/5,81% | |
| PI | 182/3,65% | 198/3,97% | 4611/92,39% | | PI | 59/4,81% | 43/3,50% | 1125/91,69% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6254/77,86% | | | | 1523/75,85% | | | | |

Tabela 14: Resultados de acerto para o quarto conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|-------------|------------|-------------|----------------|---|------------|------------|-------------|------------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1058/80,46% | 82/6,24% | 175/13,31% | 940/ 11,70% | SP | 275/81,60% | 19/5,64% | 43/12,76% | 215/10,72% |
| PE | 125/16,30% | 591/77,05% | 51/6,65% | | PE | 26/12,62% | 160/77,67% | 20/9,71% | |
| PI | 232/4,63% | 185/3,69% | 4593/91,68% | | PI | 51/4,09% | 42/3,37% | 1155/92,55% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6242/77,71% | | | | 1590/79,26% | | | | |

Tabela 15: Resultados de acerto para o quinto conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|-------------|------------|-------------|----------------|---|------------|------------|-------------|------------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1164/86,16% | 24/1,78% | 163/12,07% | 924/ 11,50% | SP | 293/85,67% | 7/2,05% | 42/12,28% | 231/11,52% |
| PE | 123/16,23% | 591/77,97% | 44/5,80% | | PE | 31/17,71% | 132/75,43% | 12/6,86% | |
| PI | 206/4,12% | 206/4,12% | 4587/91,76% | | PI | 60/4,77% | 63/5,01% | 1135/90,22% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6342/78,96% | | | | 1560/77,77% | | | | |

Tabela 16: Resultados de acerto para o sexto conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|-------------|------------|-------------|-----------------|---|------------|------------|-------------|------------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1077/84,54% | 28/2,20% | 169/13,27% | 1011/ 12,59% | SP | 261/77,68% | 11/3,27% | 64/19,05% | 272/13,55% |
| PE | 112/15,86% | 538/76,20% | 56/7,93% | | PE | 34/16,50% | 153/74,27% | 19/9,22% | |
| PI | 188/3,73% | 185/3,67% | 4668/92,60% | | PI | 44/3,69% | 47/3,94% | 1103/92,38% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6283/78,22% | | | | 1517/75,55% | | | | |

Tabela 17: Resultados de acerto para o sétimo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|----------------|------------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | | Quantidade/Percentual | | | | |
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1022/79,97% | 85/6,65% | 171/13,38% | 933/ 11,62% | SP | 259/78,48% | 26/7,88% | 45/13,64% | 250/12,45% |
| PE | 122/15,78% | 595/76,97% | 56/7,24% | | PE | 26/11,35% | 184/80,35% | 19/8,30% | |
| PI | 199/3,94% | 178/3,53% | 4671/92,53% | | PI | 43/3,59% | 51/4,25% | 1105/92,16% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6288/78,29% | | | | 1548/77,09% | | | | |

Tabela 18: Resultados de acerto para o oitavo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|----------------|------------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | | Quantidade/Percentual | | | | |
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1019/81,26% | 33/2,63% | 202/16,11% | 968/ 12,05% | SP | 267/81,16% | 6/1,82% | 56/17,02% | 268/13,35% |
| PE | 123/15,81% | 587/75,45% | 68/8,74% | | PE | 26/14,86% | 135/77,14% | 14/8,00% | |
| PI | 200/3,97% | 198/3,93% | 4634/92,09% | | PI | 58/4,69% | 50/4,05% | 1128/91,26% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6240/77,69% | | | | 1530/76,20% | | | | |

Tabela 19: Resultados de acerto para o nono conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|---------------------|------------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | | Quantidade/Percentual | | | | |
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1058/84,71% | 28/2,24% | 163/13,05% | 1085 /13,5 1% | SP | 275/87,30% | 4/1,27% | 36/11,43% | 252/12,55% |
| PE | 129/18,17% | 534/75,21% | 47/6,62% | | PE | 29/15,59% | 145/77,96% | 12/6,45% | |
| PI | 218/4,37% | 184/3,69% | 4686/91,94% | | PI | 58/4,62% | 41/3,27% | 1156/92,11% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6178/76,92% | | | | 1576/78,49% | | | | |

Tabela 20: Resultados de acerto para o décimo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|--------------------|------------------------------|------------|------------|-------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | | Quantidade/Percentual | | | | |
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 1141/82,15% | 94/6,77% | 154/11,09% | 818/ 10,1 8% | SP | 288/83,24% | 20/5,78% | 38/10,98% | 210/10,46% |
| PE | 126/15,18% | 658/79,28% | 46/5,54% | | PE | 30/15,38% | 148/75,90% | 17/8,72% | |
| PI | 213/4,26% | 186/3,72% | 4596/92,01% | | PI | 56/4,46% | 56/4,46% | 1145/91,09% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 6395/79,62% | | | | 1581/78,74% | | | | |

APÊNDICE C

Tabelas de Confusão pra Três Classes Com Reclassificação (ENSAIO 2)

Tabela 21: Resultados de acertos para o primeiro conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|------------|-------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1344/76,93% | 167/9,56% | 236/13,51% | SP | 336/73,04% | 56/12,17% | 68/14,78% |
| PE | 192/17,02% | 845/74,91% | 91/8,07% | PE | 49/18,42% | 190/71,43% | 27/10,15% |
| PI | 251/4,87% | 231,4,48% | 4675/90,65% | PI | 74/5,77% | 61/4,76% | 1147/89,47% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 6864/85,46% | | | | 1673/83,32% | |

Tabela 22: Resultados de acertos para o segundo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|------------|-------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1257/71,91% | 218/12,47% | 217/12,44% | SP | 370/79,91% | 30/6,48% | 63/13,61% |
| PE | 164/15,16% | 833/74,31% | 75/6,69% | PE | 47/17,22% | 203/74,36% | 23/8,42% |
| PI | 238/4,58% | 232/4,49% | 4668/90,34% | PI | 79/6,21% | 58/4,56% | 1135/89,23% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 6913/86,07% | | | | 1708/85,06% | |

Tabela 23: Resultados de acertos para o terceiro conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1257/71,91% | 218/12,47% | 273/15,62% | SP | 333/72,55% | 63/13,73% | 63/13,73% |
| PE | 164/15,16% | 805/74,40% | 113/10,44% | PE | 35/11,22% | 239/76,60% | 38/12,18% |
| PI | 238/4,58% | 222/4,27% | 4742/91,16% | PI | 57/4,61% | 61/4,93% | 1119/90,46% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6804/84,71% | | | 1691/84,21% | | | |

Tabela 24: Resultados de acertos para o quarto conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1331/75,24% | 210/11,87% | 228/12,89% | SP | 333/76,03% | 56/12,79% | 49/11,19% |
| PE | 203/18,27% | 817/73,54% | 91/8,19% | PE | 40/14,13% | 217/76,68% | 26/9,19% |
| PI | 279/5,42% | 235/4,56% | 4638/90,02% | PI | 71/5,52% | 52/4,04% | 1164/90,44% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6786/84,49% | | | 1714/85,36% | | | |

Tabela 25: Resultados de acertos para o quinto conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1430/81,16% | 100/5,68% | 232/13,17% | SP | 372/83,60% | 17/3,82% | 56/12,58% |
| PE | 229/20,37% | 818/72,78% | 77/6,85% | PE | 55/20,37% | 190/70,37% | 25/9,26% |
| PI | 278/5,40% | 228/4,43% | 4640/90,17% | PI | 76/5,88% | 67/5,18% | 1150/88,94% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6888/85,76% | | | 1712/85,26% | | | |

Tabela 26: Resultados de acertos para o sexto conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1374/78,51% | 139/7,94% | 237/13,54% | SP | 324/70,90% | 51/11,16% | 82/17,94% |
| PE | 209/19,28% | 786/72,51% | 89/8,21% | PE | 54/17,42% | 222/71,61% | 34/10,97% |
| PI | 257/4,94% | 208/4,00% | 4733/91,05% | PI | 58/4,67% | 62/5,00% | 1121/90,33% |
| TOTAL DE ACERTOS | | | 6893/85,82% | 1667/83,02% | | | |

Tabela 27: Resultados de acertos para o sétimo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1292/73,91% | 219/12,53% | 237/13,56% | SP | 338/73,64% | 61/13,29% | 60/13,07% |
| PE | 167/15,43% | 784/72,46% | 131/12,11% | PE | 36/11,54% | 239/76,60% | 37/11,86% |
| PI | 267/5,13% | 207/3,98% | 4728/90,89% | PI | 57/4,61% | 63/5,09% | 1117/90,30% |
| TOTAL DE ACERTOS | | | 6804/84,71% | 1694/84,36% | | | |

Tabela 28: Resultados de acertos para o oitavo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1293/74,14% | 197/11,30% | 254/14,56% | SP | 348/75,16% | 53/11,45% | 62/13,39% |
| PE | 192/17,13% | 827/73,77% | 102/9,10% | PE | 48/17,58% | 204/74,73% | 21/7,69% |
| PI | 260/5,03% | 227/4,39% | 4680/90,57% | PI | 70/5,50% | 59/4,64% | 1143/89,86% |
| TOTAL DE ACERTOS | | | 6800/84,66% | 1695/84,41% | | | |

Tabela 29: Resultados de acertos para o nono conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1395/78,86% | 151/8,54% | 223/12,61% | SP | 351/80,14% | 40/9,13% | 47/10,73% |
| PE | 227/20,43% | 801/72,10% | 83/7,47% | PE | 48/16,96% | 212/74,91% | 23/8,13% |
| PI | 282/5,47% | 231/4,48% | 4639/90,04% | PI | 75/5,83% | 48/3,73% | 1164/90,44% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6835/85,10% | | | 1727/86,01% | | | |

Tabela 30: Resultados de acertos para o décimo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|------------|------------|-------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 1323/75,09% | 230/13,05% | 209/11,86% | SP | 341/76,63% | 53/11,91% | 64/14,38% |
| PE | 173/15,39% | 863/76,78% | 88/7,83% | PE | 44/16,30% | 198/73,33% | 23/8,52% |
| PI | 278/5,40% | 223/4,33% | 4645/90,26% | PI | 80/6,19% | 63/4,87% | 1150/88,94% |
| TOTAL DE ACERTOS | 6831/85,05% | | | 1689/84,11% | | | |

APÊNDICE D (ENSAIO 3)

Tabelas de Confusão pra Duas Classes

Tabela 31: Resultados de acerto para o primeiro conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | |
|------------------------------------|--------------|------------|------------------------------|-------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | Quantidade/Percentual | | |
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14887/98,33% | 253/1,67% | SP | 3689/97,93% | 78/2,07% |
| P | 10/1,58% | 624/98,42% | P | 6/3,41% | 170/96,59% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15511/98,33% | | 3859/97,87% | | |

Tabela 32: Resultados de acerto para o segundo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | |
|------------------------------------|--------------|------------|------------------------------|-------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | Quantidade/Percentual | | |
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14899/98,31% | 256/1,69% | SP | 3684/98,19% | 68/1,81% |
| P | 12/1,94% | 607/98,06% | P | 3/1,57% | 188/98,43% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15506/98,30% | | 3872/98,20% | | |

Tabela 33: Resultados de acerto para o terceiro conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-----------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14928/98,6 3% | 208/1,37% | | 3720/98,65 % | 51/1,35% |
| P | 19/2,93% | 629/97,07% | | 9/5,23% | 163/94,77% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15557/98,56% | | | 3883/98,48% | |

Tabela 34: Resultados de acerto para o quarto conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14917/98,6 2% | 209/1,38% | | 98,65% | 51/1,35% |
| P | 16/2,47% | 632/97,53% | | 9/5,56% | 153/94,44% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15549/98,57% | | | 3883/94,48% | |

Tabela 35: Resultados de acerto para o quinto conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-----------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14918/98,6 2% | 209/1,38% | | 3724/98,49 % | 57/1,51% |
| P | 16/2,47% | 632/97,53% | | 5/3,09% | 157/96,91% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15546/98,55% | | | 3881/98,43% | |

Tabela 36: Resultados de acerto para o sexto conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-----------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14915/98,5 9% | 214/1,41% | | 3721/98,49 % | 57/1,51% |
| P | 17/2,64% | 628/97,36% | | 4/2,42% | 161/97,58% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15543/98,54% | | | 3882/98,45% | |

Tabela 37: Resultados de acerto para o sétimo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14911/98,5 7% | 217/1,43% | | 3736/98,86% | 43/1,14% |
| P | 20/3,10% | 626/96,90% | | 4/2,44% | 160/97,56% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15537/98,50% | | | | |

Tabela 38: Resultados de acerto para o oitavo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-----------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14906/98,5 3% | 222/1,47% | | 3729/98,68 % | 50/1,32% |
| P | 17/2,63% | 629/97,37% | | 5/3,05% | 159/96,65% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15535/98,48% | | | 3888/98,61% | |

Tabela 39: Resultados de acerto para o nono conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-----------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14895/98,5 8% | 215/1,42% | | 3748/98,71 % | 49/1,29% |
| P | 20/3,01% | 644/96,99% | | 4/2,74% | 142/97,26% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15539/98,51% | | | 3890/98,66% | |

Tabela 40: Resultados de acerto para o décimo conjunto de treinamento e teste (duas classes).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | |
|---|------------------|------------|---|-----------------|------------|
| | SP | P | | SP | P |
| SP | 14910/98,5 7% | 216/1,43% | | 3733/98,73 % | 48/1,27% |
| P | 19/2,93% | 629/97,07% | | 4/2,47% | 158/97,53% |
| TOTAL DE ACERTOS | 15539/98,51% | | | 3891/98,68% | |

APÊNDICE E (ENSAIO 3)

Tabelas de Confusão pra Três Classes Sem Reclassificação

Tabela 41: Resultados de acerto para o primeiro conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|---------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12809/99,84% | 20/0,16% | 0/0% | 33/0,21% | SP | 3217/99,60% | 13/0,40% | 0/0% | 6/0,15% |
| PE | 1853/82,17% | 154/6,83% | 248/11,00% | | PE | 445/79,75% | 47/8,42% | 66/11,83% | |
| PI | 0/0% | 13/1,97% | 646/98,03% | | PI | 0/0% | 2/1,34% | 147/98,66% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13609/86,26% | | | | 3411/86,51% | | | | |

Tabela 42: Resultados de acerto para o segundo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|---------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12803/99,81% | 23/0,18% | 1/0,01% | 25/0,16% | SP | 3209/99,32% | 21/0,65% | 1/0,03% | 3/0,08% |
| PE | 1865/82,09% | 147/6,47% | 260/11,44% | | PE | 443/80,55% | 45/8,18% | 62/11,27% | |
| PI | 0/0% | 13/1,99% | 639/98,01% | | PI | 0/0% | 4/2,52% | 155/97,48% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13589/86,14% | | | | 3409/86,46% | | | | |

Tabela 43: Resultados de acerto para o terceiro conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|---------|
| | SP | PE | P | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12801/99,88% | 15/0,12% | 0/0% | 46/0,29% | SP | 3218/99,66% | 9/0,28% | 2/0,06% | 9/0,23% |
| PE | 1857/82,42% | 137/6,08% | 259/11,50% | | PE | 448/80,58% | 40/7,19% | 68/12,23% | |
| PI | 0/0% | 13/1,97% | 648/98,03% | | PI | 0/0% | 2/1,34% | 147/98,66% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13586/86,12% | | | | 3405/86,36% | | | | |

Tabela 44: Resultados de acerto para o quarto conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|----------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12801/99,86% | 16/0,12% | 2/0,02% | 47/0,30% | SP | 3222/99,91% | 3/0,09% | 0/0% | 15/0,38% |
| PE | 1869/82,74% | 127/5,62% | 263/11,64% | | PE | 451/83,06% | 26/4,79% | 66/12,15% | |
| PI | 0/0% | 13/2,00% | 638/98,00% | | PI | 0/0% | 2/1,25% | 158/98,75% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13566/85,99% | | | | 3406/86,38% | | | | |

Tabela 45: Resultados de acerto para o quinto conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|---------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12821/99,79% | 27/0,21% | 0/0% | 16/0,10% | SP | 3210/99,78% | 7/0,22% | 0/0% | 1/0,03% |
| PE | 1833/81,58% | 162/7,21% | 252/11,21% | | PE | 489/84,02% | 40/6,87% | 53/9,11% | |
| PI | 0/0% | 15/2,26% | 650/97,74% | | PI | 0/0% | 4/2,78% | 140/97,22% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13633/86,42% | | | | 3390/85,95% | | | | |

Tabela 46: Resultados de acerto para o sexto conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|----------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12844/99,91% | 12/0,09% | 0/0% | 57/0,36% | SP | 3174/99,75% | 8/0,25% | 0/0% | 14/0,36% |
| PE | 1856/83,34% | 118/5,30% | 253/11,36% | | PE | 455/79,27% | 44/7,67% | 75/13,07% | |
| PI | 0/0% | 10/1,57% | 626/98,43% | | PI | 0/0% | 3/1,73% | 170/98,27% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13588/86,13% | | | | 3388/85,92% | | | | |

Tabela 47: Resultados de acerto para o sétimo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|------------------|-----------|------------|--------------|---|-----------------|----------|------------|----------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12834/99,8 6% | 17/0,13% | 1/0,01% | 57/0, 36% | SP | 3190/99,94 % | 2/0,06% | 0/0% | 17/0,43% |
| PE | 1877/84,02 % | 117/5,24% | 240/10,74% | | PE | 447/80,11% | 31/5,56% | 80/14,34% | |
| PI | 0/0% | 11/1,74% | 622/98,26% | | PI | 0/0% | 4/2,27% | 172/97,73% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13573/86,04% | | | | 3393/86,05% | | | | |

Tabela 48: Resultados de acerto para o oitavo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|------------------|-----------|------------|--------------|---|-----------------|----------|------------|---------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12824/99,8 8% | 15/0,12% | 0/0% | 25/0, 16% | SP | 3218/99,81 % | 6/0,19% | 0/0% | 6/0,15% |
| PE | 1875/83,07 % | 125/5,54% | 257/11,39% | | PE | 469/84,05% | 23/4,12% | 66/11,83% | |
| PI | 0/0% | 13/1,98% | 642/98,02% | | PI | 0/0% | 2/1,29% | 153/98,71% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13591/86,15% | | | | 3394/86,08% | | | | |

Tabela 49: Resultados de acerto para o nono conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|----------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12795/99,90% | 13/0,10% | 0/0% | 56/0,35% | SP | 3209/99,72% | 9/0,28% | 0/0% | 25/0,63% |
| PE | 1860/81,94% | 126/5,55% | 284/12,51% | | PE | 444/83,30% | 43/8,07% | 46/8,63% | |
| PI | 0/0% | 11/1,71% | 631/98,29% | | PI | 0/0% | 2/1,20% | 165/98,80% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13552/85,90% | | | | 3417/86,66% | | | | |

Tabela 50: Resultados de acerto para o décimo conjunto de treinamento e teste (três classes sem reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) Quantidade/Percentual | | | | | Acertos (Conjuntos de teste) Quantidade/Percentual | | | | |
|---|--------------|-----------|------------|----------|---|-------------|----------|------------|---------|
| | SP | PE | PI | NC | | SP | PE | PI | NC |
| SP | 12813/99,84% | 16/0,12% | 4/0,03% | 28/0,18% | SP | 3214/99,63% | 12/0,37% | 0/0% | 2/0,05% |
| PE | 1893/82,99% | 138/6,05% | 250/10,96% | | PE | 432/80,30% | 30/5,58% | 76/14,13% | |
| PI | 0/0% | 13/2,05% | 621/97,95% | | PI | 0/0% | 2/1,13% | 175/98,87% | |
| TOTAL DE ACERTOS | 13572/86,03% | | | | 3419/86,71% | | | | |

APÊNDICE F (ENSAIO 3)

Tabelas de Confusão pra Três Classes Com Reclassificação

Tabela 51: Resultados de acertos para o primeiro conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|------------------|--------------|------------|------------------------------|-----------------|----------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12813/99,80 % | 26/0,20% | 0/0% | SP | 3222/99,60 % | 13/0,40% | 0/0% |
| PE | 1851/81,36% | 170/7,47% | 254/11,16% | PE | 445/79,32% | 49/8,73% | 67/11,94% |
| PI | 0/0% | 14/2,11% | 648/97,89% | PI | 0/0% | 2/1,34% | 147/98,66% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13631/86,40% | | 3418/86,64% | | | |

Tabela 52: Resultados de acertos para o segundo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|------------------|--------------|------------|------------------------------|-----------------|--------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12812/99,78 % | 28/0,22% | 0/0% | SP | 3209/99,29 % | 22/0,68 % | 1/0,03% |
| PE | 1873/82,01% | 154/6,74% | 257/11,25% | PE | 443/80,25% | 47/8,51 % | 62/11,23% |
| PI | 0/0% | 13/1,99% | 639/98,01% | PI | 0/0% | 4/2,52% | 155/97,48% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13605/86,24% | | 3411/86,51% | | | |

Tabela 53: Resultados de acertos para o terceiro conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|------------|------------------------------|-------------|----------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12815/99,81% | 24/0,19% | 0/0% | SP | 3219/99,57% | 12/0,37% | 2/0,06% |
| PE | 1865/81,98% | 147/6,46% | 263/11,56% | PE | 451/80,39% | 42/7,49% | 68/12,12% |
| PI | 1/0,15% | 13/1,96% | 649/97,89% | PI | 0/0% | 2/1,34% | 147/98,66% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13611/86,27% | | 3408/86,43% | | | |

Tabela 54: Resultados de acertos para o quarto conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|------------|------------------------------|-------------|----------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12816/99,81% | 22/0,17% | 2/0,02% | SP | 3226/99,81% | 6/0,19% | 0/0% |
| PE | 1880/86,04% | 140/6,41% | 165/7,55% | PE | 454/82,40% | 30/5,44% | 67/12,16% |
| PI | 0/0% | 13/2,00% | 638/98,00% | PI | 0/0% | 2/1,25% | 158/99,75% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13594/86,72% | | 3414/86,58% | | | |

Tabela 55: Resultados de acertos para o quinto conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|------------|------------------------------|-------------|----------|-----------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12826/99,77% | 29/0,23% | 0/0% | SP | 3210/99,78% | 7/0,22% | 0/0% |
| PE | 1835/81,41% | 166/7,36% | 253/11,22% | PE | 489/84,02% | 40/6,87% | 53/9,11% |
| PI | 0/0% | 17/2,55% | 650/97,45% | PI | 0/0% | 4/2,78% | 140/9,11% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13642/86,47% | | 3390/85,98% | | | |

Tabela 56: Resultados de acertos para o sexto conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|------------|------------------------------|-------------|----------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12853/99,78% | 28/0,22% | 0/0% | SP | 3179/99,62% | 12/0,38% | 0/0% |
| PE | 1866/82,64% | 136/6,02% | 256/11,34% | PE | 456/78,89% | 47/8,13% | 75/12,98% |
| PI | 0/0% | 11/1,73% | 626/98,27% | PI | 0/0% | 4/2,30% | 170/97,70% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13615/86,30% | | 3396/86,13% | | | |

Tabela 57: Resultados de acertos para o sétimo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|------------------|--------------|------------|------------------------------|-----------------|--------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12849/99,83 % | 21/0,16% | 1/0,01% | SP | 3195/99,81 % | 6/0,19% | 0/0% |
| PE | 1892/83,35% | 128/5,64% | 250/11,01% | PE | 448/79,15% | 37/6,54 % | 81/4,31% |
| PI | 0/0% | 12/1,89% | 623/98,11% | PI | 0/0% | 4/2,27% | 172/97,73% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13600/86,21% | | 3404/86,33% | | | |

Tabela 58: Resultados de acertos para o oitavo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|------------------|--------------|------------|------------------------------|-----------------|--------------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12828/99,85 % | 19/0,15% | 0/0% | SP | 3218/99,78 % | 7/0,22% | 0/0% |
| PE | 1879/82,27% | 129/5,68% | 265/11,66% | PE | 471/83,66% | 25/4,44 % | 67/11,90% |
| PI | 0/0% | 13/1,98% | 643/98,02% | PI | 0/0% | 2/1,29% | 153/98,71% |
| TOTAL DE ACERTOS | | 13600/86,21% | | 3396/86,13% | | | |

Tabela 59: Resultados de acertos para o nono conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|--------------|-----------|--------------|------------------------------|-------------|----------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12809/99,79% | 27/0,21% | 0/0% | SP | 3216/99,38% | 20/0,62% | 0/0% |
| PE | 1868/81,36% | 142/6,18% | 286/12,46% | PE | 446/82,59% | 48/8,89% | 46/8,52% |
| PI | 0/0% | 13/2,02% | 631/97,98% | PI | 0/0% | 2/1,20% | 165/98,80% |
| TOTAL DE ACERTOS | | | 13582/86,09% | 3429/86,96% | | | |

Tabela 60: Resultados de acertos para o décimo conjunto de treinamento e teste (três classes com reclassificação).

| Acertos (Conjuntos de treinamento) | | | | Acertos (Conjuntos de teste) | | | |
|------------------------------------|--------------|-----------|--------------|------------------------------|-------------|----------|------------|
| Quantidade/Percentual | | | | Quantidade/Percentual | | | |
| | SP | PE | PI | | SP | PE | PI |
| SP | 12820/99,81% | 20/0,16% | 5/0,04% | SP | 3215/99,63% | 12/0,37% | 0/0% |
| PE | 1896/82,54% | 146/6,36% | 255/11,10% | PE | 432/80,15% | 31/5,75% | 76/14,10% |
| PI | 0/0% | 13/2,05% | 621/97,95% | PI | 0/0% | 2/1,13% | 175/98,87% |
| TOTAL DE ACERTOS | | | 13587/86,12% | 3421/86,76% | | | |