



**José Luis Carrasco Gutiérrez**

**Monitoramento da Instrumentação da Barragem de  
Corumbá-I por Redes Neurais e Modelos de Box & Jenkins**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Celso Romanel

Rio de Janeiro, Setembro de 2003.



**José Luis Carrasco Gutiérrez**

## **Monitoramento da Instrumentação da Barragem de Corumbá-I por Redes Neurais e Modelos de Box & Jenkins**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Celso Romanel**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Andréa Sell Dyminski**

Departamento de Construção Civil – UFPR

**Marcus Peigas Pacheco**

Instituto Politécnico de Nova Friburgo

**Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, Setembro de 2003.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **José Luis Carrasco Gutiérrez**

Graduou-se em Engenharia Civil na UNSAAC (Universidad Nacional San Antonio Abad de Cusco-Peru) em 1996. Participou de várias obras geotécnicas e de saneamento no Peru e na Bolívia, onde também obteve o reconhecimento do grau de engenheiro civil. Os resultados da presente pesquisa de mestrado foram apresentados e publicados em eventos realizados no Brasil e no Exterior.

#### Ficha Catalográfica

Carrasco Gutiérrez, José Luis

Monitoramento da instrumentação da barragem de Corumbá I por redes neurais e modelos de Box & Jenkins / José Luis Carrasco Gutiérrez; orientador: Celso Romanel. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

v., 146 f.: il. ; 29.7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Barragem Corumbá-I. 3. Redes neurais artificiais. 4. Modelos de Box & Jenkins. 5. Monitoramento de barragem. 6. Séries temporais. 7. Instrumentação. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

Ao meuorado filho Gabriel,  
À minha querida esposa Jackeline,  
Aos meus queridos pais Lida e Mauro.

## **Agradecimentos**

A Deus, por permitir que todos os meus objetivos se tornem realidade.

Aos meus pais, Lida e Mauro, por todo o amor, carinho e ensinamentos que foram por mim recebidos e cultivados.

A minha esposa Jackeline pelo carinho, amor e atenção de todas as horas.

Aos meus irmãos Gabriela e Carlos Enrique que, com os seus valiosos comentários, também contribuíram na realização deste trabalho.

Aos meus sogros Teresa e Frick pelo apoio sincero.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, fundamentais para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Ao professor Celso Romanel pela orientação, colaboração, amizade e parceria, importantes para o sucesso da pesquisa.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil pelos ensinamentos, amizade e espírito de colaboração.

Ao Departamento de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., em especial ao Eng. Celso J. Pires, pelo apoio incondicional e por permitir total acesso aos dados instrumentais da barragem Corumbá-I apresentados neste trabalho.

Agradeço aos professores Carlos Hall e Marley Vellasco do Departamento de Engenharia Elétrica pelas sugestões recebidas.

Aos meus colegas e amigos da PUC-Rio, com os quais compartilhei inesquecíveis experiências acadêmicas e de vida.

À Ana Rôxo pela dedicação aos alunos da pós-graduação em Engenharia Civil.

## Resumo

Carrasco Gutiérrez, José Luis. Romanel, Celso. **Monitoramento da instrumentação da barragem Corumbá I por redes neurais e modelos de Box & Jenkins**. Rio de Janeiro, 2003. 146p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho empregou-se a técnica de redes neurais artificiais e modelos de Box & Jenkins (1970) para análise, modelagem e previsão dos valores de vazão e de cargas de pressão na barragem Corumbá I, do sistema Furnas Centrais Elétricas, a partir dos dados de instrumentação disponíveis desde 1997. A previsão de valores prováveis pode auxiliar em tomadas de decisão durante a operação da barragem.

A utilização de métodos estatísticos e de redes neurais artificiais é especialmente recomendado em situações onde a solução através de métodos determinísticos, analíticos ou numéricos, torna-se difícil por envolver modelagens tridimensionais, com condições de contorno complexas e incertezas na variação espacial e temporal das propriedades dos materiais que constituem a barragem e sua fundação.

Tradicionalmente, as análises de séries temporais são normalmente abordadas sob a perspectiva de métodos estatísticos, como os modelos de Box & Jenkins. No entanto, redes neurais artificiais têm-se constituído ultimamente em uma alternativa atraente para investigações de séries temporais por sua capacidade de análise de problemas de natureza não-linear e não-estacionários.

Neste trabalho são apresentadas três aplicações envolvendo o comportamento da barragem Corumbá I: previsão das vazões através da fundação junto à ombreira esquerda, previsão das cargas de pressão em piezômetros instalados no núcleo central da barragem e no solo residual de fundação e, finalmente, a previsão dos valores das leituras em um piezômetro supostamente danificado em determinado instante de tempo. Em todos estes casos, os resultados obtidos pelos modelos de Box & Jenkins e redes neurais artificiais foram bastante satisfatórios.

## Palavras-chave

Barragem Corumbá-I; redes neurais artificiais; modelos de Box & Jenkins; monitoramento de barragem; séries temporais; instrumentação.

## Abstract

Carrasco Gutiérrez, José Luis. Romanel, Celso (Advisor). **Monitoring of the Corumbá-I dam instrumentation by neural networks and the Box & Jenkins' models**. Rio de Janeiro, 2003. 146p. MSc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, artificial neural networks and the Box & Jenkins models (1970) were used for analysis, modeling and forecasts of water discharges and pressure head development in the Corumbá-I dam, owned by Furnas Centrais Elétricas, from the instrumentation data recorded since 1997. Prediction of the probable values can be a powerful tool for early detection of abnormal conditions during the dam operation.

The use of statistical methods and artificial neural network techniques are specially recommend in situations where a solution with a deterministic approach, analytical or numerical, is difficult for involving three-dimensional modeling, complex boundary conditions and uncertainty with respect to the spatial and temporal variation of the material properties of the dam and its foundation.

Time series analyses are traditionally carried out using a statistical approach, such as the Box & Jenkins models. However, artificial neural networks have become in the recent years an attractive alternative for time series problems due to their inherent ability to analyze nonlinear and non-stationary phenomena.

Three applications of time series analysis, related to the instrumentation data collected from Corumba-I dam, are presented and discussed in this thesis: forecast of water discharges through the foundation near the dam left abutment, prediction of pressure heads in piezometers installed in the impermeable central core and the residual soil foundation and, finally, prediction of the pressure heads that would be read in a piezometer that, at a given instant of time, stops working being supposedly damaged. In all these cases, the results obtained from the Box & Jenkins models as well as the artificial neural networks are quite satisfactory.

## Keywords

Corumbá-I dam; artificial neural networks; Box & Jenkins' models; dam monitoring; time series; instrumentation.

## Sumário

1 INTRODUÇÃO	19
2 INSTRUMENTAÇÃO E SEGURANÇA DE BARRAGENS	22
2.1. Introdução	22
2.2. Objetivos básicos da instrumentação de barragens	22
2.3. Instrumentação e segurança de barragens	25
2.4. Análise dos dados de instrumentação	27
3 BARRAGEM DE CORUMBÁ I	29
3.1. Características gerais	29
3.2. Aspectos geotécnicos	30
3.2.1. Geologia local	31
3.2.2. Características da fundação na ombreira esquerda.	31
3.2.3. Características dos materiais da barragem.	32
3.3. Instrumentação da barragem	33
3.4. Percolação através da ombreira esquerda	35
4 ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS	38
4.1. Introdução	38
4.2. Séries temporais	38
4.2.1. Procedimentos estatísticos de previsão	39
4.2.2. Estacionariedade de uma série	40
4.2.3. Análise de autocorrelação	41
4.3. Modelos ARIMA de Box & Jenkins	42
4.3.1. Etapas de modelagem	44
4.4. Redes neurais artificiais	46
4.4.1. Redes neurais na previsão de séries temporais	49
4.4.1.1. Redes neurais com atrasos no tempo	50
4.4.1.2. Redes neurais recorrentes	53
4.4.2. Etapas de uma análise por redes neurais	54



4.4.3. Treinamento de redes neurais	56
4.5. Avaliação do desempenho das previsões	58
5 CASOS ESTUDADOS	60
5.1. Previsão da vazão na fundação da ombreira esquerda	60
5.1.1. Introdução	60
5.1.2. Análise e preparação dos dados	60
5.1.3. Previsão da vazão pelo modelo de Box & Jenkins	61
5.1.4. Análise da vazão por redes neurais	63
5.1.5. Introdução	71
5.1.6. Análise e preparação dos dados	71
5.1.7. Análise das cargas de pressão pelo modelo de Box & Jenkins	73
5.1.8. Análise das cargas de pressão por redes neurais	79
5.2. Previsão das cargas de pressão em um piezômetro admitido danificado	84
5.2.1. Análise das cargas de pressão por redes neurais	84
6 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES	90
6.1. Conclusões	90
6.2. Sugestões	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICE A	97
APÊNDICE B	105
APÊNDICE C	117
APÊNDICE D	121
APÊNDICE E	137

## Lista de figuras

Figura 3.1 Localização da barragem Corumbá I. (Furnas Centrais Elétricas S.A.)	29
Figura 3.2 Panorama e arranjo geral da barragem Corumbá I. (Furnas Centrais Elétricas S.A.)	30
Figura 3.3 Seção geológica no eixo da barragem Corumbá-I (Caproni et al., 1994)	31
Figura 3.4 Seções típicas da barragem de Corumbá-I, no leito do rio e junto à ombreira esquerda. (Furnas Centrais Elétricas S.A.)	33
Figura 3.5 Seções instrumentadas da barragem Corumbá-I. (Furnas Centrais Elétricas S.A.)	34
Figura 3.6 Surgência d'água no talude da ombreira esquerda com vazão de 6 l/min, após tratamento. (Furnas relatório de visita à obra N° 091, 1997).	36
Figura 3.7 Surgência d'água com vazão de 260 l/min. (Furnas relatório de visita à obra N° 091, 1997).	36
Figura 3.8 Visão da ombreira esquerda, com as setas indicando a posição das surgências d'água. (Furnas relatório de visita à obra N° 091, 1997).	37
Figura 4.1 Tendências de uma série temporal (Barros, 2003).	39
Figura 4.2 Funções de autocorrelação simples e parcial para alguns processos estocásticos AR(1), MA(1) e ARMA(1,1).	45
Figura 4.3 Modelo de neurônio artificial. (Haykin, 1999).	48
Figura 4.4 Rede neural multicamada totalmente conectada (MLP).	49
Figura 4.5 Classificação das redes neurais temporais. (Soto, 1999).	50
Figura 4.6 Método de 'janelamento' para processamento temporal. Soto (1999).	51
Figura 4.7 Rede TDNN para processamento temporal (Soto, 1999).	51
Figura 4.8 Neurônio FIR numa rede multicamada (Soto, 1999).	52
Figura 4.9 Rede neural <i>feedforward</i> com janela temporal incorporando o modelo autoregressivo AR(p) não linear (Dorffner, 1996).	52
Figura 4.10 Esquema de processamento temporal utilizando redes neurais recorrentes (Soto 1999).	53
Figura 4.11 Rede neural tipo Elman. (Dorffner, 1996).	54

Figura 4.12 Redes recorrentes tipo Jordan. a) Rede tipo Jordan, esquema geral. b) Rede tipo Jordan simulando um processo ARMA não linear. (Dorffner, 1996).	54
Figura 4.13 Esquema de uma análise por redes neurais.	55
Figura 4.14 Exemplo de geração dos padrões de entrada e saída para previsão um passo à frente.	56
Figura 4.15 Validação cruzada como técnica de parada do treinamento.	58
Figura 5.1 Modelagem e previsão da vazão com o modelo AR(1) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	68
Figura 5.2 Erro relativo da vazão com o modelo AR(1) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	68
Figura 5.3 Modelagem e previsão da vazão com a rede neural RNA I para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	69
Figura 5.4 Erro relativo da vazão com a rede neural RNA I para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	69
Figura 5.5 Modelagem e previsão da vazão com a rede neural RNA VII para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	70
Figura 5.6 Erro relativo da vazão com a rede neural RNA VII para os conjuntos de treinamento, validação e teste. Previsão das cargas de pressão nos piezômetros instalados no núcleo da barragem e na fundação de solo residual.	70
Figura 5.7 Modelagem e previsão do piezômetro PZ8 com o modelo AR(2) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	75
Figura 5.8 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ8 com o modelo AR(2) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	75
Figura 5.9 Modelagem e previsão do piezômetro PZ9 com o modelo AR(1) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	76
Figura 5.10 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ9 com o modelo AR(1) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	76
Figura 5.11 Modelagem e previsão do piezômetro PZ10 com o modelo AR(1) para os conjuntos de modelagem, validação e teste..	77
Figura 5.12 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ10 com o modelo AR(1) para os conjuntos de modelagem, validação e teste..	77

Figura 5.13 Modelagem e previsão do piezômetro PZ15 com o modelo AR(2) para os conjuntos de modelagem, validação e teste	78
Figura 5.14 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ15 com o modelo AR(2) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	78
Figura 5.15 Modelagem e previsão das cargas de pressão no piezômetro PZ8 com a rede neural RNA8 IV.	80
Figura 5.16 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ8 com a rede neural RNA8 IV.	80
Figura 5.17 Modelagem e previsão das cargas de pressão no piezômetro PZ9 com a rede neural RNA9 IV.	81
Figura 5.18 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ9 com a rede neural RNA9 IV.	81
Figura 5.19 Modelagem e previsão das cargas de pressão no piezômetro PZ10 com a rede neural RNA10 I.	82
Figura 5.20 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ10 com a rede neural RNA10 I.	82
Figura 5.21 Modelagem e previsão das cargas de pressão no piezômetro PZ15 com a rede neural RNA15 IV.	83
Figura 5.22 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro PZ15 com a rede neural RNA15 IV.	83
Figura 5.23 Modelagem da carga de pressão no piezômetro danificado PZ7, para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	86
Figura 5.24 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro danificado PZ7, para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	86
Figura 5.25 Modelagem da carga de pressão no piezômetro danificado PZ8, para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	87
Figura 5.26 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro danificado PZ8, para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	87
Figura 5.27 Modelagem da carga de pressão no piezômetro danificado PZ9, para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	88
Figura 5.28 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro danificado PZ9, para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	88
Figura 5.29 Modelagem da carga de pressão no piezômetro danificado PZ10, para	

os conjuntos de treinamento, validação e teste.	89
Figura 5.30 Erro relativo da carga de pressão no piezômetro danificado PZ10, para os conjuntos de treinamento, validação e teste.	89
Figura B.1 Série de vazão para o conjunto de modelagem (104 primeiros valores da série histórica).	105
Figura B.2 Funções de autocorrelação simples e parcial da série de vazão (E-views 4.0).	107
Figura B.3 Representação gráfica das séries de vazão, do modelo ajustado AR(1) e dos resíduos.	109
Figura B.4 Correlograma do quadrado dos resíduos obtidos pelo modelo AR(1) na modelagem da vazão.	109
Figura B.5 Série das cargas de pressão no piezômetro PZ8.	111
Figura B.6 Funções de autocorrelação simples e parcial da série para PZ8. (E-views 4.0).	113
Figura B.7 Representação gráfica das séries temporais de cargas de pressão, previsão pelo modelo AR(2) e distribuição dos resíduos para o piezômetro PZ8.	115
Figura B.8 Correlograma do quadrado dos resíduos obtidos pelo modelo AR(2) na série temporal das cargas de pressão no piezômetro PZ8.	115

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 Dados de instalações dos piezômetros pneumáticos na barragem Corumbá I. (Furnas Relatório N° FR85A-MC8-513).	35
Tabela 4.1 Série temporal de poro-pressão em piezômetro “A”. (Soto, 1999).	41
Tabela 5.1 Desempenho do modelo AR(1) para os conjuntos de modelagem, validação e teste.	62
Tabela 5.2 Siglas adotadas para as variáveis consideradas na modelagem da vazão.	63
Tabela 5.3 Padrões de entrada considerados nos modelos de redes neurais.	65
Tabela 5.4 Resumo das melhores topologias de cada modelo de RNA considerado.	66
Tabela 5.5 Desempenho da rede neural RNA I na previsão da vazão.	66
Tabela 5.6 Desempenho da rede neural RNA VII na previsão da vazão.	67
Tabela 5.7 Siglas adotadas na modelagem das cargas de pressão dos piezômetros PZ8, PZ9, PZ10, PZ15.	72
Tabela 5.8 Matriz de correlação linear entre as leituras dos piezômetros e as cotas do nível d’água do reservatório.	72
Tabela 5.9 Equações polinomiais para representação do comportamento das leituras piezométricas nos modelos de Box & Jenkins.	73
Tabela 5.10 Desempenho dos modelos autoregressivos de Box & Jenkins para previsão da carga de pressão nos piezômetros PZ8, PZ9, PZ10, e PZ15.	74
Tabela 5.11 Desempenho das melhores topologias de redes neurais para previsão da carga de pressão nos piezômetros PZ8, PZ9, PZ10 e PZ15.	79
Tabela 5.12 Desempenho das melhores topologias de redes neurais para previsão das cargas de pressão nos piezômetros “danificados” PZ7, PZ8, PZ9 e PZ10.	85
Tabela 5.13 Variáveis explicativas para os melhores modelos neurais dentre as testadas para previsão das cargas de pressão nos piezômetros “danificados” PZ7, PZ8, PZ9 e PZ10.	85
Tabela A.1 Séries históricas da vazão a jusante na região da ombreira esquerda, poro-pressões no piezômetro 15 (PZ15) e nível d’água do reservatório a	

montante.	99
Tabela A.2 Séries históricas de cargas de pressão dos piezômetros instalados no núcleo da barragem Corumbá I e do nível d'água a montante do reservatório	103
Tabela A.3 Estatística básica das séries vazão (VZ), carga de pressão no piezômetro PZ15 e cotas do nível d'água do reservatório a montante (NA)	104
Tabela A.4 Estatística básica das leituras de carga de pressão nos piezômetros PZ7, PZ8, PZ9, PZ10 e das cotas do nível d'água do reservatório a montante.	104
Tabela B.1 Teste de Dickey–Fuller Ampliado (ADF test) para a série de vazão (E-views 4.0)	106
Tabela B.2 Teste de significância dos parâmetros para o modelo AR(1) na previsão da vazão.	108
Tabela B.3 Teste de ARCH para avaliação da variância dos resíduos obtidos pelo ajuste do modelo AR(1) na previsão de vazão.	110
Tabela B.4 Teste de Dickey–Fuller Ampliado (ADF test) para valores do piezômetro PZ8.	112
Tabela B.5 Teste de significância dos parâmetros para o modelo AR(2) relativo à série de cargas de pressão do piezômetro PZ8.	114
Tabela B.6 Teste de ARCH para avaliação da variância dos resíduos obtidos no modelo AR(2) para o piezômetro PZ8.	116
Tabela C.1 Desempenho da RNA I para modelagem da vazão.	117
Tabela C.2 Desempenho da RNA II para modelagem da vazão.	117
Tabela C.3 Desempenho da RNA III para modelagem da vazão.	118
Tabela C.4 Desempenho da RNA IV para modelagem da vazão.	118
Tabela C.5 Desempenho da RNA V para modelagem da vazão.	118
Tabela C.6 Desempenho da RNA VI para modelagem da vazão.	119
Tabela C.7 Desempenho da RNA VII para modelagem da vazão.	119
Tabela C.8 Desempenho da RNA VIII para modelagem da vazão.	119
Tabela C.9 Desempenho da RNA IX para modelagem da vazão.	120
Tabela D.1 Modelos de redes neurais considerados para o piezômetro pneumático PZ8.	121

Tabela D.2 Desempenho do modelo RNA8 I.	121
Tabela D.3 Desempenho do modelo RNA8 II.	122
Tabela D.4 Desempenho do modelo RNA8 III.	122
Tabela D.5 Desempenho do modelo RNA8 IV.	122
Tabela D.6 Desempenho do modelo RNA8 V.	123
Tabela D.7 Desempenho do modelo RNA8 VI.	123
Tabela D.8 Desempenho do modelo RNA8 VII.	123
Tabela D.9 Resumo das melhores topologias de cada modelo de RNA considerado para o piezômetro PZ8.	124
Tabela D.10 Modelos de redes neurais consideradas para o piezômetro pneumático PZ9.	125
Tabela D.11 Desempenho do modelo RNA9 I.	125
Tabela D.12 Desempenho do modelo RNA9 II.	125
Tabela D.13 Desempenho do modelo RNA9 III.	126
Tabela D.14 Desempenho do modelo RNA9 IV.	126
Tabela D.15 Desempenho do modelo RNA9 V.	126
Tabela D.16 Desempenho do modelo RNA9 VI.	127
Tabela D.17 Desempenho do modelo RNA9 VII.	127
Tabela D.18 Desempenho do modelo RNA9 VIII.	127
Tabela D.19 Resumo das melhores topologias de cada modelo considerado para o piezômetro PZ9.	128
Tabela D.20 Modelos de redes neurais considerados para o piezômetro pneumático PZ10.	128
Tabela D.21 Desempenho do modelo RNA10 I.	129
Tabela D.22 Desempenho do modelo RNA10 II.	129
Tabela D.23 Desempenho do modelo RNA10 III.	129
Tabela D.24 Desempenho do modelo RNA10 IV.	130
Tabela D.25 Desempenho do modelo RNA10 V.	130
Tabela D.26 Desempenho do modelo RNA10 VI.	130
Tabela D.27 Resumo das melhores topologias de cada modelo considerado para o piezômetro PZ10.	131
Tabela D.28 Modelos de redes neurais considerados para o piezômetro pneumático PZ15.	132



Tabela D.29 Desempenho do modelo RNA15 I.	132
Tabela D.30 Desempenho do modelo RNA15 II.	132
Tabela D.31 Desempenho do modelo RNA15 III.	133
Tabela D.32 Desempenho do modelo RNA15 IV.	133
Tabela D.33 Desempenho do modelo RNA15 V.	133
Tabela D.34 Desempenho do modelo RNA15 VI.	134
Tabela D.35 Desempenho do modelo RNA15 VII.	134
Tabela D.36 Desempenho do modelo RNA15 VIII.	134
Tabela D.37 Desempenho do modelo RNA15 IX.	135
Tabela D.38 Desempenho do modelo RNA15 XI.	135
Tabela D.39 Desempenho do modelo RNA15 XII.	135
Tabela D.40 Resumo das melhores topologias de cada modelo considerado para o PZ15.	136
Tabela E.1 Modelos neurais considerados para modelagem do piezômetro pneumático PZ7 danificado.	137
Tabela E.2 Desempenho do modelo neural RNA7_d I.	138
Tabela E.3 Desempenho do modelo neural RNA7_d II.	138
Tabela E.4 Desempenho do modelo neural RNA7_d III.	138
Tabela E.5 Desempenho do modelo neural RNA7_d IV.	139
Tabela E.6 Resumo das melhores topologias de cada modelo considerado para o piezômetro PZ7.	139
Tabela E.7 Modelos neurais considerados na modelagem do piezômetro pneumático PZ8 danificado.	140
Tabela E.8 Desempenho do modelo neural RNA8_d I.	140
Tabela E.9 Desempenho do modelo neural RNA8_d II.	140
Tabela E.10 Desempenho do modelo neural RNA8_d III.	141
Tabela E.11 Desempenho do modelo neural RNA8_d IV.	141
Tabela E.12 Desempenho do modelo neural RNA8_d V.	141
Tabela E.13 Resumo das melhores topologias de cada modelo considerado para o piezômetro PZ8.	142
Tabela E.14 Modelos neurais considerados para a modelagem do piezômetro pneumático PZ9 “danificado”.	142
Tabela E.15 Desempenho do modelo neural RNA9_d I.	143

Tabela E.16 Desempenho do modelo neural RNA9_d II.	143
Tabela E.17 Desempenho do modelo neural RNA9_d III.	143
Tabela E.18 Resumo das melhores topologias de cada modelo admitido, correspondente ao PZ9.	144
Tabela E.19 Modelos neurais considerados para modelagem do piezômetro pneumático PZ10 “danificado”.	144
Tabela E.20 Desempenho do modelo neural RNA10_d I.	145
Tabela E.21 Desempenho do modelo neural RNA10_d II.	145
Tabela E.22 Desempenho do modelo neural RNA10_d III	145
Tabela E.23 Desempenho do modelo neural RNA10_d IV	146
Tabela E.24 Resumo das melhores topologias de cada modelo considerado para o piezômetro PZ10. .	146