5 PREVISÃO DE SÉRIES TEMPORAIS DE VAZÃO DE DRENOS DA BARRAGEM DE FUNIL

5.1 Introdução

Existem situações, como por exemplo, em grandes obras de engenharia (portos, barragens, usinas nucleares, etc.), em que é fundamental o conhecimento das características do subsolo do terreno onde se pretende implantar o empreendimento e posteriormente o acompanhamento do funcionamento em operação.

Na fase de operação, o funcionamento da obra deve ser acompanhado para verificar se está dentro do previsto em projeto. São monitoradas diversas grandezas relevantes para a segurança do empreendimento.

O programa de monitoramento da obra é composto geralmente por uma série de instrumentações que fornecem o conhecimento adequado da operação da obra. Estas medições podem ser de temperatura, deslocamentos, vazão em drenos, etc., possibilitando a obtenção de algumas características como, por exemplo, as deformações.

As instrumentações, como por exemplo, medições de piezômetro, fornecem dados pontuais que podem ser espraiados para toda a área de interesse. Em obras de maior porte e grande responsabilidade, a quantidade de dados pode se tornar suficiente para permitir a construção de modelos de variabilidade espacial ou temporal das propriedades de interesse com base em métodos geoestatísticos ou em redes neurais artificiais.

Neste capítulo investiga-se a distribuição temporal da vazão dos drenos da barragem de Funil através do método estatístico de Box e Jenkins (1970), redes neurais temporais (RNT) e métodos geoestatísticos.

5.2 Análise com as séries com intervalo de tempo constante

Siglas	Significado
Т	Data
NA	Nível do reservatório a montante (m)
TMP	Temperatura (°C)
VZ	Vazão (l/min.)
VZ1	Vazão do dreno "D191" (l/min.)
VZ2	Vazão do dreno "D192" (l/min.)
VZ3	Vazão do dreno "D193" (l/min.)

A tabela 5.1 descreve as siglas utilizadas neste trabalho.

Tabela 5.1 Siglas adotadas.

5.2.1 Previsão obtida pelo método de Box & Jenkins (1970)

Para previsão pelo modelo de Box & Jenkins utilizou-se o programa Eviews v 4.0 (2001). A condição de estacionariedade da série de vazão dos drenos "D192", "D192" e "D193" foram comprovadas pelo teste da raiz unitária (Dickey & Fuller, 1979) enquanto que o exame do comportamento das funções de autocorrelação simples e autocorrelação parcial indicaram que a seqüência histórica de valores pode ser adequadamente modelada através dos modelos autoregressivos lineares AR(1) ("D191" e "D192") e AR(2) ("D193"). Na seleção do modelo apropriado de Box & Jenkins procurou-se capturar toda a estrutura de dependência serial presente na seqüência de dados, de tal modo que os erros não apresentassem nenhuma dependência em relação ao tempo (ruído branco). A metodologia detalhada utilizada na análise pelo método de Box & Jenkins (1970), sugerida por Gutiérrez (2003), está apresentada no apêndice A.

As equações 5.1 a 5.3 indicam os modelos obtidos para os drenos. As tabelas 6.2 a 6.4 mostram o desempenho das modelagens através das métricas estatísticas, enquanto que as figuras 5.1 a 5.3 ilustram graficamente os resultados.

$$D191=0.5731375666+0.9373114823*D191(-1)$$
(5.1)

$$D192=1.623486487+0.7888842178*D192(-1)$$
(5.2)

D193=0.2210363617+0.7481342115*D193(-1)+0.1965102496*D193(-2) (5.3)

Na análise das séries com intervalo de tempo constante, foi considerado somente um conjunto de aprendizado, devido o número reduzido de amostras (455 amostras). Então as métricas de desempenho foram obtidas somente para o conjunto de aprendizado pela modelagem de Box & Jenkins (1970).

MAPE	RMSE	UTHEIL
6.31	0.72	1.0032

Tabela 5.2 Desempenho da previsão por Box & Jenkins para o dreno "D191".

MAPE	RMSE	UTHEIL
4.74	0.43	1.0615

Tabela 5.3 Desempenho da previsão por Box & Jenkins para o dreno "D192".

MAPE	RMSE	UTHEIL
4.70	0.39	0.9664

Tabela 5.4 Desempenho da previsão por Box & Jenkins para o dreno "D193".



Figura 5.1 Modelagem e previsão da vazão com o modelo AR(1) para o dreno "D191".



Figura 5.2 Modelagem e previsão da vazão com o modelo AR(1) para o dreno "D192".



Figura 5.3 Modelagem e previsão da vazão com o modelo AR(2) para o dreno "D193".

5.2.2 Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal com janelamento

Para previsão pela técnica de rede neural artificial utilizou-se o programa MatLab 6.1 (2001). Para obter o melhor modelo neural foram testadas quatro redes com as entradas e saídas descritas na tabela 5.5. O primeiro modelo é função somente da própria série histórica da vazão com um retraso, o segundo considera dois retrasos da série, o terceiro com três retrasos da série e o quarto modelo considera quatro retrasos da série.

As tabelas 5.6 a 5.8 indicam o desempenho das redes. Em todas as tabelas que apresentam os desempenhos das redes, os melhores modelos são marcados em negrito. No processo de seleção dos melhores modelos foram avaliados os erros obtidos nas fases de aprendizado e de validação, sendo considerado mais importante os erros obtidos na validação, onde a capacidade de generalização da rede é examinada.

A validação do treinamento foi feita com a técnica leave-one-out, nesta técnica apenas uma amostra é utilizada para calcular o erro de validação. Então a métrica U de Theil não foi calculada, já que precisa de uma amostra anterior. O gráfico de validação não será apresentado, pois o conjunto de validação é composto de apenas uma amostra.

As figuras 5.4 a 5.6 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT. Em todas as figuras que comparam os valores reais com os obtidos pelas RNT, são fornecidos também os erros relativos das estimativas em relação aos dados amostrais da série temporal.

Modelos	Entradas	Saída
Ι	VZ _{t-1}	VZ _t
II	VZ_{t-2}, VZ_{t-1}	VZ _t
III	VZ _{t-3} ,VZ _{t-2} ,VZ _{t-1}	VZ _t
IV	$VZ_{t-4}, VZ_{t-3}, VZ_{t-2}, VZ_{t-1}$	VZ _t

Tabela 5.5 Entradas e Saídas adotadas.

Modelos	Aprendizado			Vali	dação
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Ι	5.65	0.71	0.9872	2.51	0.17
II	5.78	0.72	1.0038	2.53	0.17
III	5.61	0.71	0.9878	2.81	0.19
IV	5.65	0.72	0.9983	2.59	0.17

Tabela 5.6 Desempenho da previsão por RNT com janelamento para o dreno "D191".

Modelos	Aprendizado			Vali	dação
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Ι	3.96	0.41	1.0120	1.44	0.10
II	3.79	0.40	0.9780	1.31	0.09
III	3.74	0.39	0.9492	1.28	0.09
IV	3.75	0.38	0.9411	1.51	0.11

Tabela 5.7 Desempenho da previsão por RNT com janelamento para o dreno "D192".

Modelos	Aprendizado			Vali	dação
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Ι	4.78	0.30	0.9852	2.19	0.08
II	4.76	0.30	0.9738	1.74	0.07
III	4.67	0.29	0.9489	1.77	0.06
IV	4.70	0.29	0.9482	1.45	0.06

Tabela 5.8 Desempenho da previsão por RNT com janelamento para o dreno "D193".



Figura 5.4 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT com janelamento para o dreno "D191".



Figura 5.5 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT com janelamento para o dreno "D192".



Figura 5.6 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT com janelamento para o dreno "D193".

5.2.3 Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal Elman

Foram testadas quatro redes com as mesmas topologias descritas na tabela 5.5. As tabelas 5.9 a 5.11 indicam o desempenho das redes. As figuras 5.7 a 5.9 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT.

Modelos	Aprendizado			Vali	dação
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Ι	5.73	0.72	0.9973	3.02	0.20
II	5.78	0.72	1.0015	2.64	0.21
III	5.75	0.73	1.0225	2.46	0.17
IV	5.72	0.73	1.0125	2.80	0.20

Modelos	Aprendizado			Vali	dação
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Ι	3.85	0.40	0.9897	1.46	0.10
II	3.80	0.40	0.9823	1.47	0.10
III	3.78	0.39	0.9614	1.54	0.11
IV	3.82	0.39	0.9546	1.57	0.11

Tabela 5.10 Desempenho da previsão por RNT Elman para o dreno "D192".

Aprendizado			Vali	dação
MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
4.79	0.30	0.9881	1.52	0.06
4.79	0.30	0.9802	2.22	0.09
4.80	0.30	0.9617	1.60	0.06
4.84	0.30	0.9632	1.81	0.07
	A MAPE 4.79 4.79 4.80 4.84	APE RMSE 4.79 0.30 4.79 0.30 4.80 0.30	APEMAPEMAPEMAPE4.790.300.98814.790.300.98024.800.300.96174.840.300.9632	NAPE RMSE UTHEIL MAPE 4.79 0.30 0.9881 1.52 4.79 0.30 0.9802 2.22 4.80 0.30 0.9617 1.60 4.84 0.30 0.9632 1.81

Tabela 5.11 Desempenho da previsão por RNT Elman para o dreno "D193".



Figura 5.7 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Elman para o dreno "D191".



Figura 5.8 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Elman para o dreno "D192".



Figura 5.9 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Elman para o dreno "D193".

5.2.4 Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal FIR

Na rede FIR, os valores de entrada são considerados associados à ordem M dos filtros. Por exemplo, o modelo I descrito na tabela 5.5 possui o parâmetro de entrada vazão e filtros com memória de ordem 1 (M=1). Enquanto que a rede II apresenta filtros com memória 2 (M=2), mas com as mesmas entradas da rede I.

Na RNT FIR, para cada modelo, são avaliada seis topologias diferentes com 2, 3, 5, 8, 10 ou 15 neurônios na camada oculta. As tabelas 5.12 a 5.14 apresentam o desempenho da melhor topologia para cada modelo, indicando o número de neurônios da camada oculta. As figuras 5.10 a 5.12 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT.

Na análise com intervalo de tempo constante para a RNT FIR, a validação do modelo com um conjunto de validação não foi realizada. A melhor previsão para cada modelo foi obtida com o menor erro observado no conjunto de aprendizado.

Modelos	Neurônios	Aprendizado		
	Ocultos	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	5	7.99	1.18	1.6313
II	15	9.53	1.47	2.0319
III	10	9.75	1.58	2.1972
IV	10	10.15	1.75	2.4317

	Гabela 5.12 D	esempenho (da previsão	por RNT FIR	para o dreno	"D191"
--	---------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--------

Modelos	Neurônios	Aprendizado		
	Ocultos	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	3	4.40	0.51	1.2702
II	15	4.87	0.60	1.4748
III	15	5.39	0.67	1.6516
IV	15	5.91	0.74	1.8261

Tabela 5.13 Desempenho da previsão por RNT FIR para o dreno "D192".

Modelos	Neurônios	Aprendizado		
	Ocultos	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	2	5.49	0.42	1.3518
II	15	6.05	0.50	1.6139
III	15	6.50	0.56	1.8296
IV	15	6.97	0.62	2.0242

Tabela 5.14 Desempenho da previsão por RNT FIR para o dreno "D193".



Figura 5.10 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT FIR para o dreno "D191".



Figura 5.11 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT FIR para o dreno "D192".



Figura 5.12 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT FIR para o dreno "D193".

5.2.5 Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal Jordan

Na rede neural Jordan, foram testados os quatro modelos descritos na tabela 5.5. Para cada modelo, foi acrescentado ao conjunto de entradas o valor obtido pela previsão obtida da interação anterior (tabela 5.15). As tabelas 5.16 a 5.18 indicam o desempenho das redes. As figuras 5.13 a 5.15 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT.

Modelos	Entradas	Saída
Ι	VZ_{t-1} , VZ_{t-1}	VZ _t
II	$VZ_{t-2}, VZ_{t-1}, VZ_{t-1}$	VZ _t
III	VZ_{t-3} , VZ_{t-2} , VZ_{t-1} , VZ_{t-1}	VZ _t
IV	$VZ_{t-4}, VZ_{t-3}, VZ_{t-2}, VZ_{t-1}, VZ_{t-1}$	VZ _t

Tabela 5.15 Entradas e Saídas adotadas.

Modelos	Aprendizado			Vali	dação
	MAPE RMSE UTHEIL M		MAPE	RMSE	
Ι	5.74	0.73	1.0166	2.07	0.14
II	5.62	0.72	1.0015	2.04	0.15
III	5.64	0.72	0.9980	2.69	0.18
IV	5.69	0.72	1.0081	2.45	0.18

Tabela 5.16 Desempenho da previsão por RNT Jordan para o dreno "D191".

Modelos	Aprendizado			Validação	
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Ι	3.84	0.40	0.9822	1.34	0.09
II	3.78	0.39	0.9728	1.35	0.09
III	3.72	0.38	0.9470	1.51	0.10
IV	3.76	0.38	0.9439	1.36	0.09

Tabela 5.17 Desempenho da previsão por RNT Jordan para o dreno "D192".

Modelos	Aprendizado			Vali	dação
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Ι	4.78	0.31	0.9888	1.89	0.07
II	4.77	0.30	0.9789	1.98	0.08
III	4.70	0.29	0.9530	1.84	0.07
IV	4.73	0.29	0.9512	1.58	0.06

Tabela 5.18 Desempenho da previsão por RNT Jordan para o dreno "D193".



Figura 5.13 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Jordan para o dreno "D191".



Figura 5.14 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Jordan para o dreno "D192".



Figura 5.15 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Jordan para o dreno "D193".

5.2.6 Previsão obtida com o método geoestatístico

A condição de estacionariedade das séries de vazão foi comprovada pelo teste da raiz unitária. A série sendo estacionária permite a previsão pela técnica de krigagem ordinária. Para previsão pelo método geoestatístico utilizou-se os programas Gslib 2.0 (1997) e VARIOWIN 2.2 (1996). Os dados utilizados na geração do variograma experimental são as próprias séries históricas. As tabelas 5.19 a 5.21 mostram o desempenho das previsões utilizando krigagem ordinária. As figuras 5.16 a 5.18 mostram os variogramas experimentais escolhidos e os variogramas teóricos para os modelos esférico, exponencial e gaussiano. Os parâmetros dos variogramas teóricos são fornecidos na tabelas 5.22 a 5.24.

Como na análise pela modelagem de Box & Jenkins (1970), foi considerado somente o conjunto de aprendizado com as métricas de desempenho obtidas somente para este conjunto.

MAPE	RMSE	UTHEIL
4.02	0.50	0.6884

Tabela 5.19 Desempenho da previsão por krigagem ordinária para o dreno "D191".

MAPE	RMSE	UTHEIL
3.02	0.31	0.7712

Tabela 5.20 Desempenho da previsão por krigagem ordinária para o dreno "D192".

MAPE	RMSE	UTHEIL
3.73	0.24	0.7792

Tabela 5.21 Desempenho da previsão por krigagem ordinária para o dreno "D193".



Figura 5.16 Variogramas experimentais e teóricos para o dreno "D191": (a) modelo esférico, (b) modelo exponencial e (c) modelo gaussiano.



Figura 5.17 Variogramas experimentais e teóricos para o dreno "D192": (a) modelo esférico, (b) modelo exponencial e (c) modelo gaussiano.



Figura 5.18 Variogramas experimental e teórico para o dreno "D193": (a) modelo esférico, (b) modelo exponencial e (c) modelo gaussiano.

Nas figuras 5.16 a 5.18 os variogramas teóricos esférico e gaussiano se adaptam melhor aos variogramas experimentais. O modelo esférico foi escolhido por ser um modelo mais adequado a problemas em que os dados apresentam um comportamento mais irregular. O *lag* de 14 dias foi utilizado para geração dos variogramas.

PARÂMETROS	NUGGET	RANGE	SILL	ANISOTROPIA
DO MODELO	0.00	150.0	0.6	1.00

Tabela 5.22 Valores dos parâmetros do modelo teórico esférico para o dreno "D191".

PARÂMETROS	NUGGET	RANGE	SILL	ANISOTROPIA
DO MODELO	0.00	200.00	0.65	1.00

Tabela 5.23 Valores dos parâmetros do modelo teórico esférico para o dreno "D192".

PARÂMETROS	NUGGET	RANGE	SILL	ANISOTROPIA
DO MODELO	0.00	200.00	0.35	1.00

Tabela 5.24 Valores dos parâmetros do modelo teórico esférico para o dreno "D193".

As figuras 5.19 e 5.21 comparam os valores reais com os obtidos pela krigagem ordinária, para as séries.



Figura 5.19 Modelagem e previsão da vazão com krigagem ordinária para o dreno "D191".





Figura 5.20 Modelagem e previsão da vazão com krigagem ordinária para o dreno "D192".





Figura 5.21 Modelagem e previsão da vazão com krigagem ordinária para o dreno "D193".

5.2.7 Análise dos Resultados

As tabelas 5.25 a 5.27 apresentam os melhores modelos obtidos pelo método de Box & Jenkins (1970), pelas RNT's e pelo método geoestatístico. Em relação aos resultados, pode-se observar que:

- Observando os gráficos de erros, nota-se que os erros ficaram em um intervalo de ±20%. Apresentado a ordem dos erros dos dados mais irregulares (outliers) das séries semelhantes. Isto indica que para todos os métodos a precisão dos resultados afetada pela presença de ruídos introduzidos pela súbita variação das séries temporais;
- O comportamento temporal das séries de vazão foi captado pela RNT com janelamento indicando que os resultados com outras RNT's deveriam apresentar previsões similares. As RNT's com janelamento, Elman e Jordan apresentaram resultados similares;
- A utilização do mesmo algoritmo de treinamento para as RNT's com janelamento, Elman e Jordan, o algoritmo de regularização bayseana associado ao método leave-one-out, permitiu que se comparem apenas os tipos de RNT's. Não se considera a influência do algoritmo de treinamento, que será igual para todas as redes;
- A RNT FIR apresentou os piores resultados. O algoritmo de treinamento retropropagação temporal associado ao método de validação cruzada parece não ter conseguido capturar o melhor modelo;
- O modelo de Box & Jenkins apresentou desempenho levemente inferior para os drenos, com exceção do observado para o dreno "D193";
- O modelo AR(1) para o dreno "D191" foi confirmado para a maioria das RNT's;
- Observa-se que em quase todas as RNT's, o coeficiente U de Theil é menor do que 1, evidenciando que as previsões obtidas têm melhor desempenho do que uma previsão ingênua;
- Os valores da métrica U de Theil para o método geoestatístico bem menores que os das RNT's se justifica pelo *lag* adotado na geração dos variogramas ser de 14 dias. Os valores de U de Theil das RNT's janelamento, Elman e Jordan para intervalo de tempo quinzenal

Métodos	Modelos	Aprendizado			Validação	
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Box & Jenkins	AR(1)	6.31	0.72	1.0032		
RNT com	Ι	5.65	0.71	0.9872	2.51	0.17
janelamento						
RNT Elman	Ι	5.73	0.72	0.9973	3.02	0.20
RNT FIR	Ι	7.99	1.18	1.6313		
RNT Jordan	III	5.64	0.72	0.9980	2.69	0.18
Geoestatística		4.02	0.50	0.6884		

apresentados nas tabelas 5.28 a 5.30 são equivalentes aos obtidos pelo método geoestatístico já que apresentam o mesmo intervalo de tempo;

Tabela 5.25 Desempenho das previsões para o dreno "D191".

Métodos	Modelos	Aprendizado			Validação	
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Box & Jenkins	AR(1)	4.74	0.43	1.0615		
RNT com	III	3.74	0.39	0.9492	1.28	0.09
janelamento						
RNT Elman	IV	3.82	0.39	0.9546	1.57	0.11
RNT FIR	Ι	4.40	0.51	1.2702		
RNT Jordan	IV	3.76	0.38	0.9439	1.36	0.09
Geoestatística		3.02	0.31	0.7712		

Tabela 5.26 Desempenho das previsões para o dreno "D192".

Métodos	Modelos	Aprendizado			Validação	
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Box & Jenkins	AR(2)	4.70	0.39	0.9664		
RNT com	IV	4.70	0.29	0.9482	1.45	0.06
janelamento						
RNT Elman	III	4.80	0.30	0.9617	1.60	0.06
RNT FIR	Ι	5.49	0.42	1.3518		
RNT Jordan	IV	4.73	0.29	0.9512	1.58	0.06
Geoestatística		3.73	0.24	0.7792		

Tabela 5.27 Desempenho das previsões para o dreno "D193".

 Para verificar a influência do intervalo de tempo na previsão foram feitas análises com intervalo de tempo quinzenal e mensal. O dreno D-191 foi escolhido por apresentar erros maiores. A tabela 5.28 a 5.31 apresentam os desempenhos das previsões. Para os intervalos de tempo quinzenal e mensal foram considerados os melhores modelos da análise semanal. Analisando o desempenho das previsões, o aumento do intervalo de tempo melhorou o U-Theil para todas as redes. Esta melhoria justifica-se pela definição da métrica U-theil que analisa se a previsão é melhor que a previsão ingênua. Com o intervalo de tempo maior, os valores de vazão consecutivos devem apresentar uma diferença mais acentuada, enquanto que na métrica MAPE houve um desempenho ligeiramente inferior, indicando que o intervalo de tempo semanal apresenta as melhores previsões. Os gráficos para os intervalos de tempo quinzenal e mensal são apresentados no anexo B.

Métodos	Modelos	Aprendizado			Valid	ação
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Semanal	Ι	5.65	0.71	0.9872	2.51	0.17
Quinzenal	Ι	5.81	0.71	0.6613	2.14	0.14
Mensal	Ι	6.46	0.75	0.4376	2.45	0.16

Tabela 5.28 Desempenho das previsões para o dreno "D191" com a RNT com janelamento.

Métodos	Modelos	Aprendizado			Valid	ação
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Semanal	Ι	5.73	0.72	0.9973	3.02	0.20
Quinzenal	Ι	5.89	0.75	0.7022	2.61	0.18
Mensal	Ι	6.74	0.80	0.4705	2.77	0.19

Tabela 5.29 Desempenho das previsões para o dreno "D191" com a RNT Elman.

Métodos	Modelos	Neurônios	Aprendizado		
			MAPE	RMSE	UTHEIL
Semanal	Ι	5	7.99	1.18	1.6313
Quinzenal	Ι	15	10.34	1.54	1.4379
Mensal	Ι	15	20.49	2.45	1.4423

Tabela 5.30 Desempenho das previsões para o dreno "D191" com a RNT FIR.

Métodos	Modelos	Aprendizado			Valid	ação
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE
Semanal	III	5.64	0.72	0.9980	2.69	0.18
Quinzenal	III	5.92	0.73	0.6826	2.29	0.17
Mensal	III	5.27	0.66	0.4278	2.84	0.20

Tabela 5.31 Desempenho das previsões para o dreno "D191" com a RNT Jordan.

5.3

Análise com as séries com intervalo de tempo variável

5.3.1

Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal com janelamento

Para obter o melhor modelo neural foram testadas oito redes com as entradas e saídas descritas nas tabelas 5.32 a 5.34. Os modelos neurais são função das próprias séries históricas de vazão, do nível d'água do reservatório e da temperatura. Devido as amostras não estarem todas espaçadas com freqüência semanal, as datas das medições foram consideradas como entrada. As tabelas 5.35 a 5.37 indicam o desempenho das redes. As figuras 5.22 A 5.24 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT.

Modelos	Entradas	Saída					
Ι	T_{t-1} , NA t-1, TMP t-1, VZ1 t-1, T t	VZ1 _t					
II	T _{t-2} , NA _{t-2} , TMP _{t-2} , VZ1 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ1 _{t-1} , T _t	VZ1 _t					
III	$T_{t-1}, VZ1_{t-1}, T_t$	VZ1 _t					
IV	T_{t-2} , VZ1 t-2, T_{t-1} , VZ1 t-1, T_t	VZ1 _t					
V	T_{t-1} , NA t-1, VZ1 t-1, T t	VZ1 _t					
VI	T _{t-2} , NA _{t-2} , VZ1 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , VZ1 _{t-1} , T _t	VZ1 t					
VII	T_{t-1} , VZ2 _{t-1} , VZ3 _{t-1} , VZ1 _{t-1} , T _t	VZ1 t					
VIII	T _{t-2} , VZ2 _{t-2} , VZ3 _{t-2} , VZ1 _{t-2} , T _{t-1} , VZ2 _{t-1} , VZ3 _{t-1} , VZ1 _{t-1} , T _t	VZ1 t					
Tabela 5.32	abela 5.32 Entradas e Saídas adotadas para o dreno "D191".						

Modelos	Entradas	Saída
Ι	T _{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ2 _{t-1} , T _t	VZ2 _t
II	T _{t-2} , NA _{t-2} , TMP _{t-2} , VZ2 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ2 _{t-1} , T _t	VZ2 _t
III	$T_{t-1}, VZ2_{t-1}, T_t$	VZ2 _t
IV	T_{t-2} , VZ2 t-2, T_{t-1} , VZ2 t-1, T_t	VZ2 _t
V	T_{t-1} , NA t-1, VZ2 t-1, T t	VZ2 _t
VI	T _{t-2} , NA _{t-2} , VZ2 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , VZ2 _{t-1} , T _t	VZ2 _t
VII	T_{t-1} , $VZ1_{t-1}$, $VZ3_{t-1}$, $VZ2_{t-1}$, T_t	VZ2 _t
VIII	T _{t-2} , VZ1 _{t-2} , VZ3 _{t-2} , VZ2 _{t-2} , T _{t-1} , VZ1 _{t-1} , VZ3 _{t-1} , VZ2 _{t-1} , T _t	VZ2 _t
Tabola 5 33	Entradas o Saídas adotadas para o drono "D102"	

Tabela 5.33 Entradas e Saídas adotadas para o dreno "D192"

Modelos	Entradas	Saída
Ι	T _{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ3 _{t-1} , T _t	VZ3 _t
II	T _{t-2} , NA _{t-2} , TMP _{t-2} , VZ3 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ3 _{t-1} , T _t	VZ3 _t
III	T_{t-1} , VZ3 $_{t-1}$, T_{t}	VZ3 _t
IV	T_{t-2} , VZ3 t-2, T_{t-1} , VZ3 t-1, T_t	VZ3 _t
V	T_{t-1} , NA t-1, VZ3 t-1, T t	VZ3 _t
VI	T _{t-2} , NA _{t-2} , VZ3 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , VZ3 _{t-1} , T _t	VZ3 _t
VII	$T_{t-1}, VZ1_{t-1}, VZ2_{t-1}, VZ3_{t-1}, T_t$	VZ3 _t
VIII	T _{t-2} , VZ1 _{t-2} , VZ2 _{t-2} , VZ3 _{t-2} , T _{t-1} , VZ1 _{t-1} , VZ2 _{t-1} , VZ3 _{t-1} , T _t	VZ3 _t
Tabola 5 34	Entradas o Saídas adotadas para o dropo "D103"	

Tabela 5.34 Entradas e Saídas adotadas para o dreno "D193".

Modelos	A	Aprendizado			Validação		Teste		
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL	
Ι	5.81	0.72	0.9180	2.85	0.19	6.21	0.56	1.0770	
II	5.84	0.71	0.9117	3.16	0.22	6.26	0.55	1.0678	
III	5.98	0.77	0.9783	2.90	0.21	6.51	0.65	1.2578	
IV	6.05	0.76	0.9738	2.66	0.19	6.56	0.62	1.2036	
V	6.01	0.76	0.9646	3.06	0.22	6.99	0.66	1.2722	
VI	5.88	0.74	0.9445	2.43	0.16	6.55	0.59	1.1401	
VII	5.91	0.77	0.9763	2.48	0.16	6.41	0.65	1.2566	
VIII	6.08	0.77	0.9817	2.43	0.16	6.63	0.61	1.1806	

Tabela 5.35 Desempenho da previsão por RNT com janelamento para o dreno "D191".

Modelos	A	Aprendizado			Validação		Teste		
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL	
Ι	3.88	0.39	0.9666	1.64	0.11	5.58	0.56	0.9742	
II	3.67	0.37	0.9136	1.60	0.11	5.18	0.49	0.8543	
III	3.89	0.39	0.9770	1.63	0.11	5.57	0.57	0.9844	
IV	3.64	0.37	0.9160	1.47	0.10	5.25	0.51	0.8879	
V	3.87	0.39	0.9672	1.43	0.10	5.55	0.56	0.9717	
VI	3.65	0.37	0.9127	1.30	0.09	5.16	0.50	0.8637	
VII	3.74	0.36	0.9009	1.71	0.11	5.35	0.50	0.8705	
VIII	3.62	0.35	0.8804	1.59	0.11	5.14	0.49	0.8446	

Tabela 5.36 Desempenho da previsão por RNT com janelamento para o dreno "D192".

Modelos	Aprendizado			Validação		Teste		
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	4.84	0.30	0.9613	1.65	0.06	6.18	0.29	1.0126
II	4.55	0.28	0.9000	1.56	0.05	6.21	0.29	0.9990
III	4.88	0.31	0.9731	1.82	0.06	5.93	0.28	0.9804
IV	4.69	0.29	0.9184	1.86	0.07	5.80	0.28	0.9649
V	4.88	0.30	0.9626	1.93	0.07	6.04	0.28	0.9932
VI	4.59	0.28	0.9050	1.63	0.06	5.99	0.28	0.9830
VII	4.82	0.29	0.9296	2.09	0.07	6.37	0.29	1.0072
VIII	4.59	0.28	0.8854	2.18	0.08	5.92	0.28	0.9691

Tabela 5.37 Desempenho da previsão por RNT com janelamento para o dreno "D193".







Figura 5.22 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT com janelamento para o dreno "D191".





Figura 5.23 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT com janelamento para o dreno "D192".





Figura 5.24 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT com janelamento para o dreno "D193".

5.3.2 Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal Elman

De maneira análoga à empregada para previsão das vazões pela técnica de rede neural com janelamento, foram utilizados os oito modelos das tabelas 5.32 a 5.34. As tabelas 5.38 a 5.40 indicam o desempenho das redes. As figuras 5.25 a 5.27 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT.

Modelos	Aprendizado			Validação		Teste		
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	6.00	0.74	0.9419	2.84	0.20	6.43	0.57	1.1032
II	6.04	0.74	0.9431	3.02	0.21	6.47	0.57	1.0976
III	5.94	0.77	0.9770	2.36	0.15	6.40	0.64	1.2422
IV	6.11	0.77	0.9824	2.68	0.17	6.63	0.63	1.2189
V	6.05	0.76	0.9702	2.48	0.16	7.00	0.65	1.2583
VI	5.93	0.75	0.9599	3.15	0.21	6.62	0.60	1.1550
VII	5.92	0.77	0.9835	2.85	0.18	6.32	0.64	1.2360
VIII	6.13	0.78	0.9919	3.02	0.19	6.72	0.62	1.2003

Tabela 5.38 Desempenho da previsão por RNT Elman para o dreno "D191".

Modelos	Aprendizado			Validação		Teste		
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	3.91	0.39	0.9680	1.38	0.09	5.67	0.56	0.9684
II	3.71	0.37	0.9235	1.65	0.11	5.22	0.49	0.8432
III	3.90	0.39	0.9760	1.48	0.10	5.69	0.57	0.9827
IV	3.68	0.37	0.9224	1.44	0.10	5.33	0.50	0.8740
V	3.91	0.39	0.9693	1.46	0.10	5.64	0.56	0.9659
VI	3.70	0.37	0.9230	1.47	0.10	5.21	0.49	0.8501
VII	3.81	0.37	0.9164	1.93	0.13	5.43	0.50	0.8697
VIII	3.70	0.36	0.8968	1.35	0.09	5.25	0.48	0.8336

Tabela 5.39 Desempenho da previsão por RNT Elman para o dreno "D192".

Modelos	A	Aprendizado			Validação		Teste		
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL	
Ι	4.90	0.30	0.9621	1.97	0.07	6.13	0.29	0.9984	
II	4.58	0.29	0.9075	1.70	0.06	6.08	0.28	0.9901	
III	4.90	0.31	0.9731	1.78	0.06	5.94	0.28	0.9759	
IV	4.71	0.29	0.9214	2.12	0.07	5.81	0.28	0.9671	
V	4.92	0.30	0.9628	1.92	0.07	6.00	0.28	0.9870	
VI	4.62	0.29	0.9100	1.57	0.06	5.92	0.28	0.9793	
VII	4.86	0.29	0.9316	1.81	0.06	6.29	0.28	0.9933	
VIII	4.64	0.28	0.8993	1.81	0.07	5.85	0.28	0.9691	

Tabela 5.40 Desempenho da previsão por RNT Elman para o dreno "D193".



Figura 5.25 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Elman para o dreno "D191".



Figura 5.26 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Elman para o dreno "D192".





Figura 5.27 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Elman para o dreno "D193".

5.3.3 Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal FIR

Nas redes FIR, os modelos descritos nas tabelas 5.32 a 5.34 foram utilizados com filtros FIR de ordem um (M=1) para os modelos I, III, V, VII. Para os quatro modelos restantes a ordem foi M=2. As tabelas 5.41 a 5.43 indicam o desempenho das redes. As figuras 5.28 a 5.30 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT.

Modelos	Neurônios	Aprendizado			Teste		
	Ocultos	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	10	10.22	1.19	1.5243	11.89	1.04	2.0199
II	5	11.36	1.41	1.8005	12.64	1.12	2.1699
III	10	9.09	1.23	1.5677	9.14	0.87	1.6829
IV	5	10.06	1.41	1.8051	10.57	1.00	1.9366
V	10	10.22	1.24	1.5855	13.04	1.05	2.0367
VI	10	11.74	1.44	1.8435	14.05	1.19	2.2963
VII	15	9.93	1.26	1.6033	10.37	0.91	1.7675
VIII	5	10.74	1.46	1.8604	10.64	1.01	1.9586
	- .		~			"D 40 4"	

Tabela 5.41 Desempenho da previsão por RNT FIR para o dreno "D191".

Modelos	Neurônios	А	prendiz	ado	Teste		
	Ocultos	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	15	4.47	0.49	1.2160	5.98	0.56	0.9670
II	15	4.94	0.56	1.4080	6.71	0.63	1.1009
III	15	4.05	0.46	1.1426	5.84	0.55	0.9596
IV	3	4.59	0.54	1.3413	7.30	0.66	1.1402
V	8	4.38	0.48	1.2003	6.18	0.57	0.9886
VI	15	4.79	0.55	1.3794	6.99	0.65	1.1351
VII	10	4.47	0.47	1.1798	6.68	0.57	0.9944
VIII	10	4.63	0.53	1.3245	7.34	0.65	1.1309

Tabela 5.42 Desempenho da previsão por RNT FIR para o dreno "D192".

Modelos	Neurônios	Aprendizado			Teste		
	Ocultos	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	15	5.32	0.40	1.2588	7.43	0.34	1.1822
II	15	5.79	0.47	1.4811	7.96	0.35	1.2207
III	15	5.22	0.39	1.2414	6.92	0.33	1.1499
IV	15	5.66	0.45	1.4462	7.76	0.35	1.2212
V	15	5.27	0.39	1.2503	7.20	0.34	1.1754
VI	15	5.57	0.46	1.4598	7.69	0.34	1.1991
VII	15	5.38	0.39	1.2388	7.48	0.34	1.1853
VIII	10	5.95	0.47	1.4909	8.54	0.37	1.2956

Tabela 5.43 Desempenho da previsão por RNT FIR para o dreno "D193".



4/3/87

31/8/85

4/9/88

8/3/90



9/9/91

Tempo

12/3/93 13/9/94

16/3/96



Figura 5.28 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT FIR para o dreno "D191".



Tempo



Figura 5.29 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT FIR para o dreno "D192".







Figura 5.30 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT FIR para o dreno "D193".

5.3.4 Previsão obtida pela técnica de rede neural temporal Jordan

Na rede neural Jordan, foram testados os oito modelos descritos nas tabelas 5.32 a 5.34. Para cada modelo, foi acrescentado ao conjunto de entradas o valor

obtido pela previsão obtida da interação anterior (tabelas 5.44 a 5.46). As tabelas 5.47 a 5.49 indicam o desempenho das redes. As figuras 5.31 a 5.33 comparam os valores reais com os obtidos pela RNT.

Modelos	Entradas	Saída
Ι	T_{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ1 _{t-1} , T _t , VZ1 _{t-1}	VZ1 _t
II	T _{t-2} , NA t-2, TMP t-2, VZ1t-2, Tt-1, NA t-1, TMP t-1, VZ1t-1, T	VZ1 _t
	t,VZ1 t-1	
III	$T_{t-1}, VZ1_{t-1}, T_t, VZ1_{t-1}$	VZ1 _t
IV	T_{t-2} , $VZ1_{t-2}$, T_{t-1} , $VZ1_{t-1}$, T_t , $VZ1_{t-1}$	VZ1 _t
V	$T_{t-1}, NA_{t-1}, VZ1_{t-1}, T_{t}, VZ1_{t-1}$	VZ1 _t
VI	T_{t-2} , NA t-2, VZ1t-2, T_{t-1} , NA t-1, VZ1t-1, T_t , VZ1t-1	VZ1 _t
VII	$T_{t-1}, VZ2_{t-1}, VZ3_{t-1}, VZ1_{t-1}, T_t, VZ1_{t-1}$	VZ1 _t
VIII	T _{t-2} , VZ2 _{t-2} , VZ3 _{t-2} , VZ1 _{t-2} , T _{t-1} , VZ2 _{t-1} , VZ3 _{t-1} , VZ1 _{t-1} ,	VZ1 _t
	T _t , VZ1_{t-1}	

Tabela 5.44 Entradas e Saídas adotadas para a rede neural temporal Jordan para o dreno "D191".

Modelos	Entradas	Saída
Ι	T_{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ2 _{t-1} , T _t , VZ2 _{t-1}	VZ2 _t
II	T _{t-2} , NA _{t-2} , TMP _{t-2} , VZ2 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ2 _{t-1} ,	VZ2t
	T t, VZ2 t-1	
III	$T_{t-1}, VZ2_{t-1}, T_t, VZ2_{t-1}$	VZ2t
IV	T_{t-2} , VZ2 _{t-2} , T_{t-1} , VZ2 _{t-1} , T_t , VZ2 _{t-1}	VZ2t
V	T_{t-1} , NA _{t-1} , VZ2 _{t-1} , T_{t} , VZ2 _{t-1}	VZ2t
VI	T _{t-2} , NA _{t-2} , VZ2 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , VZ2 _{t-1} , T _t , VZ2 _{t-1}	VZ2t
VII	T_{t-1} , $VZ1_{t-1}$, $VZ3_{t-1}$, $VZ2_{t-1}$, T_t , $VZ2_{t-1}$	VZ2t
VIII	T _{t-2} , VZ1 _{t-2} , VZ3 _{t-2} , VZ2 _{t-2} , T _{t-1} , VZ1 _{t-1} , VZ3 _{t-1} , VZ2 _{t-1} ,	VZ2t
	T t, VZ2 t-1	

Tabela 5.45 Entradas e Saídas adotadas para a rede neural temporal Jordan para o dreno "D192".

Modelos	Entradas	Saída
Ι	T_{t-1} , NA t-1, TMP t-1, VZ3t-1, T t, VZ3t-1	VZ3 _t
II	T _{t-2} , NA _{t-2} , TMP _{t-2} , VZ3 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , TMP _{t-1} , VZ3 _{t-1} ,	VZ3 _t
	T t, VZ3 t-1	
III	$T_{t-1}, VZ3_{t-1}, T_{t}, VZ3_{t-1}$	VZ3 _t
IV	T_{t-2} , VZ3 _{t-2} , T_{t-1} , VZ3 _{t-1} , T_t , VZ3 _{t-1}	VZ3 _t
V	T_{t-1} , NA _{t-1} , VZ3 _{t-1} , T_{t} , VZ3 _{t-1}	VZ3 _t
VI	T _{t-2} , NA _{t-2} , VZ3 _{t-2} , T _{t-1} , NA _{t-1} , VZ3 _{t-1} , T _t , VZ3 _{t-1}	VZ3 _t
VII	T_{t-1} , $VZ1_{t-1}$, $VZ2_{t-1}$, $VZ3_{t-1}$, T_t , $VZ3_{t-1}$	VZ3 _t
VIII	T _{t-2} , VZ1 _{t-2} , VZ2 _{t-2} , VZ3 _{t-2} , T _{t-1} , VZ1 _{t-1} , VZ2 _{t-1} , VZ3 _{t-1} ,	VZ3 _t
	T_t , $VZ3_{t-1}$	

Tabela 5.46 Entradas e Saídas adotadas para a rede neural temporal Jordan para o dreno "D193".

Modelos	A	prendiz	ado	Valid	ação		Teste	
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	5.88	0.73	0.9294	3.26	0.20	6.31	0.56	1.0893
II	5.97	0.73	0.9326	2.81	0.18	6.43	0.56	1.0933
III	5.95	0.77	0.9789	2.71	0.19	6.46	0.65	1.2546
IV	6.09	0.77	0.9804	2.62	0.18	6.61	0.62	1.2105
V	6.01	0.76	0.9679	2.92	0.19	6.98	0.66	1.2680
VI	5.90	0.74	0.9493	2.75	0.19	6.58	0.59	1.1450
VII	5.92	0.77	0.9804	2.50	0.17	6.42	0.65	1.2544
VIII	6.06	0.77	0.9817	2.47	0.16	6.63	0.61	1.1832

Tabela 5.47 Desempenho da previsão por RNT Jordan temporal para o dreno "D191".

Modelos	A	prendiz	ado	Valid	ação		Teste	
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	3.88	0.39	0.9661	1.67	0.11	5.61	0.56	0.9739
II	3.68	0.37	0.9161	1.24	0.08	5.20	0.49	0.8519
III	3.89	0.39	0.9749	1.41	0.09	5.60	0.57	0.9853
IV	3.65	0.37	0.9179	1.38	0.10	5.26	0.51	0.8841
V	3.88	0.39	0.9658	1.45	0.10	5.59	0.56	0.9719
VI	3.65	0.37	0.9128	1.49	0.10	5.17	0.50	0.8609
VII	3.75	0.36	0.9031	1.62	0.11	5.37	0.50	0.8697
VIII	3.64	0.35	0.8856	1.60	0.11	5.16	0.48	0.8401

Tabela 5.48 Desempenho da previsão por RNT Jordan para o dreno "D192".

Modelos	A	prendiz	ado	Valid	ação		Teste	
	MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
Ι	4.86	0.30	0.9621	1.63	0.06	6.16	0.29	1.0086
II	4.57	0.28	0.9029	1.76	0.06	6.19	0.29	0.9970
III	4.88	0.31	0.9769	1.56	0.05	5.88	0.28	0.9755
IV	4.69	0.29	0.9190	1.81	0.06	5.79	0.28	0.9652
V	4.89	0.30	0.9640	1.90	0.06	6.01	0.28	0.9909
VI	4.59	0.28	0.9039	1.79	0.06	5.98	0.28	0.9821
VII	4.83	0.29	0.9287	2.06	0.08	6.35	0.29	1.0039
VIII	4.60	0.28	0.8866	1.81	0.07	5.92	0.28	0.9688

Tabela 5.49 Desempenho da previsão por RNT Jordan para o dreno "D193".





Figura 5.31 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Jordan para o dreno "D191".

22/10/98 10/5/99 26/11/99 13/6/00 30/12/00 18/7/01

Tempo

-50

17/9/97

5/4/98

3/2/02







Figura 5.32 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Jordan para o dreno "D192".







Figura 5.33 Modelagem e previsão da vazão com o modelo de RNT Jordan para o dreno "D193".

5.3.5 Previsão obtida com o método geoestatístico

Utiliza-se a mesma metodologia empregada na análise das séries com intervalo de tempo constante. As tabelas 5.50 a 5.52 mostram o desempenho das



Figura 5.34 Variogramas experimental e teórico para o dreno "D191": (a) modelo esférico, (b) modelo exponencial e (c) modelo gaussiano.



Figura 5.35 Variogramas experimental e teórico para o dreno "D192": (a) modelo esférico, (b) modelo exponencial e (c) modelo gaussiano.



Figura 5.36 Variogramas experimentar e teórico para o dreno "D193": (a) modelo esférico, (b) modelo exponencial e (c) modelo gaussiano.

Nas figuras 5.34 a 5.36 os variogramas teóricos esférico se adaptam melhor aos variogramas experimentais. Novamente, o *lag* de 14 dias foi utilizado para geração dos variogramas.

.Aprendizado			Teste		
MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	UTHEIL
4.43	0.56	0.7117	3.79	0.34	0.6562

Tabela 5.50 Desempenho da previsão por krigagem ordinária para o dreno "D191".

Aprendizado			Teste		
MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	UTHEIL
3.49	0.34	0.8527	4.48	0.46	0.7997

Tabela 5.51 Desempenho da previsão por krigagem ordinária para o dreno "D192".

Aprendizado			Teste		
MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	UTHEIL
4.00	0.25	0.7981	4.52	0.23	0.8125

Tabela 5.52 Desempenho da previsão por krigagem ordinária para o dreno "D193".

PARÂMETROS	NUGGET	RANGE	SILL	ANISOTROPIA
DO MODELO	0.00	480.00	2.20	1.00

Tabela 5.53 Valores dos parâmetros do modelo teórico esférico para o dreno "D191".

PARÂMETROS	NUGGET	RANGE	SILL	ANISOTROPIA
DO MODELO	0.00	220.00	0.55	1.00
E4 Valeres des perêmetres de models toéries soféries pero s'areas "D100"				

Tabela 5.54 Valores dos parâmetros do modelo teórico esférico para o dreno "D192".

PARÂMETROS	NUGGET	RANGE	SILL	ANISOTROPIA
DO MODELO	0.00	240.00	0.25	1.00

Tabela 5.55 Valores dos parâmetros do modelo teórico esférico para o dreno "D193".

As figuras 5.37 e 5.39 comparam os valores reais com os obtidos pela krigagem ordinária, para as séries.







Tempo Figura 5.37 Modelagem e previsão da vazão com krigagem ordinária para o dreno

26/11/99 13/6/00 30/12/00 18/7/01

3/2/02

22/10/98 10/5/99

-50 + 17/9/97

"D191".

5/4/98



Figura 5.38 Modelagem e previsão da vazão com krigagem ordinária para o dreno "D192".



Figura 5.39 Modelagem e previsão da vazão com krigagem ordinária para o dreno "D193".

5.3.6 Geração do intervalo de confiança utilizando os resultados da previsão obtida com o método geoestatístico

As figuras 5.40 a 5.42 mostram o histograma dos erros da previsão do modelo geoestatístico. Analisando-se os histogramas observa-se que a distribuição do erro não é gaussiana, mas a distribuição do erro é continua e unimodal. Podendo-se utilizar a desigualdade proposta por Vysochanskii-Petunin em 1980 para determinação do intervalo que compreenda 95% de probabilidade. As equações 5.4 a 5.6 mostram os valores obtidos para os intervalos de confiança para os drenos "D191", "D192" e "D193" respectivamente. As figuras 5.43 a 5.45 mostram as previsões e os intervalos de confiança. A tabela 5.56 apresenta a porcentagem de acerto dos intervalos de confiança, sendo todas superiores a probabilidade de 95%.



média = 0.004121 mediana = 0.000000desvio padrão = 0.521118 máximo = 2.909000mínimo = -3.466000

Figura 5.40 Histograma dos erros da previsão do modelo geoestatístico do dreno "D191".



mediana = -0.099500desvio padrão = 0.353849 máximo = 2.412000 mínimo = -3.794000

Figura 5.41 Histograma dos erros da previsão do modelo geoestatístico do dreno "D192".





$$\begin{aligned} \widetilde{\sigma}_{K} &= 0.52 \\ \left[\hat{V}(x_{0}) - 3\widetilde{\sigma}_{K}, \hat{V}(x_{0}) + 3\widetilde{\sigma}_{K} \right] \\ \left[\hat{V}(x_{0}) - 1.56, \hat{V}(x_{0}) + 1.56 \right] \\ \widetilde{\sigma}_{K} &= 0.35 \\ \left[\hat{V}(x_{0}) - 3\widetilde{\sigma}_{K}, \hat{V}(x_{0}) + 3\widetilde{\sigma}_{K} \right] \\ \left[\hat{V}(x_{0}) - 1.05, \hat{V}(x_{0}) + 1.05 \right] \end{aligned}$$
(5.5)

$$\widetilde{\sigma}_{K} = 0.25 \begin{bmatrix} \hat{V}(x_{0}) - 3\widetilde{\sigma}_{K}, \hat{V}(x_{0}) + 3\widetilde{\sigma}_{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{V}(x_{0}) - 0.75, \hat{V}(x_{0}) + 0.75 \end{bmatrix}$$
(5.6)



Figura 5.43 Intervalo de Confiança gerado pela previsão do método geoestatístico para o dreno "D191".





Figura 5.44 Intervalo de Confiança gerado pela previsão do método geoestatístico para o dreno "D192".



Figura 5.45 Intervalo de Confiança gerado pela previsão do método geoestatístico para o dreno "D193".

Drenos	Aprendizado	Teste
"D191"	98%	99%
"D192"	99%	97%
"D193"	98%	97%

Tabela 5.56 Desempenho do intervalo de confiança gerado pela previsão do método geoestatístico.

5.3.7

Geração do intervalo de confiança através dos erros de saída da rede utilizando os resultados da previsão obtida com a técnica de RNT com janelamento

Utiliza-se a técnica proposta por Alves da Silva & Moulin (2000) para geração de intervalos de confiança. Esta técnica foi escolhida por não ser necessário que a distribuição de erros da previsão seja gaussiana. Para estimar o intervalo de confiança, foi acrescentada uma saída do erro da previsão da vazão no melhor modelo da RNT com janelamento.

As figuras 5.46 a 5.48 mostram as previsões e os intervalos de confiança. A tabela 5.57 apresenta a porcentagem de acerto dos intervalos de confiança, já que nesta técnica o grau de confiança não é estabelecido antecipadamente. Deve ser calculado verificando o sucesso da estimação do intervalo de confiança para o conjunto de teste.



Figura 5.46 Intervalo de Confiança gerado pela técnica de saída do erro com a previsão obtida pela RNT com janelamento para o dreno "D191".



Figura 5.47 Intervalo de Confiança gerado pela técnica de saída do erro com a previsão obtida pela RNT com janelamento para o dreno "D192".



Figura 5.48 Intervalo de Confiança gerado pela técnica de saída do erro com a previsão obtida pela RNT com janelamento para o dreno "D193".

Drenos	Aprendizado	Teste
"D191"	100%	100%
"D192"	100%	99%
"D193"	100%	100%

Tabela 5.57 Desempenho do intervalo de confiança gerado pela técnica do erro de saída da rede utilizando os resultados da previsão obtida com a técnica de RNT com janelamento.

5.3.8

Geração do intervalo de confiança através de *re-amostragem dos erros* utilizando os resultados da previsão obtida com a RNT com janelamento

A técnica de *re-amostragem dos erros* também foi escolhida por não ser necessário que a distribuição de erros da previsão seja gaussiana. O conjunto de treinamento foi utilizado como conjunto de *re-amostragem dos erros*. O modelo da RNT com janelamento é o mesmo utilizado na técnica de saída de erro. A técnica foi utilizada para determinação de intervalo que compreenda 95% de probabilidade.

As figuras 5.49 a 5.51 mostram as previsões e os intervalos de confiança. A tabela 5.58 apresenta a porcentagem de acerto dos intervalos de confiança.



Figura 5.49 Intervalo de Confiança gerado pela técnica de *re-amostragem dos erros* obtida com a previsão da RNT com janelamento para o dreno "D191".





Figura 5.50 Intervalo de Confiança gerado pela técnica de *re-amostragem dos erros* obtida com a previsão da RNT com janelamento para o dreno "D192".



Figura 5.51 Intervalo de Confiança gerado pela técnica de *re-amostragem dos erros* obtida com a previsão da RNT com janelamento para o dreno "D193".

Drenos	Aprendizado	Teste
"D191"	87%	91%
"D192"	93%	93%
"D193"	84%	93%

Tabela 5.58 Desempenho do intervalo de confiança gerado pela técnica de *reamostragem dos erros* utilizando os resultados da previsão obtida com a técnica de RNT com janelamento.

5.3.9 Análise dos Resultados

As tabelas 5.59 a 5.61 apresentam os melhores modelos obtidos para as análises com intervalo de tempo variável. Em relação aos resultados, as conclusões citadas no item 5.3.7 são válidas para estes modelos. Pode-se observar ainda que:

- A determinação de quais variáveis de entrada são importantes para a previsão é feita analisando os erros de cada modelo neural testado. Para o dreno "D191" as variáveis explicativas nível do reservatório e temperatura foram importantes, já que o modelos neurais apresentaram menores erros, para as RNT's com janelamento e Jordan. Já para o dreno "D192" as variáveis explicativas mais importantes forma as vazões dos drenos "D191" e "D193". Enquanto que para o dreno "D193" somente a série de vazão foi importante para a geração dos modelos neurais;
- Apesar de o grau de correlação da série de vazão do dreno "D191" com a série de temperatura ser pequeno, o melhor modelo para as RNT com "janelamento" e Jordan consideram a série de temperatura como uma variável explicativa. Deve-se lembrar que as redes neurais são utilizadas para análise de problemas não lineares, então a rede pode capturar alguma correlação que não pode ser observada através do grau de correlação;
- Observa-se que em quase todas as RNT's, o coeficiente U de Theil foi melhor para as análises com intervalo de tempo variável quando comparadas com as obtidas com intervalo de tempo constante;

- Observando os gráficos de erros, nota-se que os erros ficaram em um intervalo de ±20%, com exceção da RNT FIR que apresenta uma variação maior.
- Vale ressaltar que o conjunto de teste selecionado apresentou várias amostras com uma freqüência de tempo diferente que o intervalo regular semanal, acarretando que o teste de generalização apresentou erros relativamente maiores que nas duas fases prévias;

Métodos	Modelo	Aprendizado			Validação		Teste		
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
RNT com janelamento	Ι	5.81	0.72	0.9180	2.85	0.19	6.21	0.56	1.0770
RNT Elman	VII	5.92	0.77	0.9835	2.85	0.18	6.32	0.64	1.2360
RNT FIR	III	9.09	1.23	1.5677			9.14	0.87	1.6829
RNT Jordan	Ι	5.88	0.73	0.9294	3.26	0.20	6.31	0.56	1.0893
Geoestatística		4.43	0.56	0.7117			3.79	0.34	0.6562

Tabela 5.59 Desempenho das previsões para o dreno "D191".

Métodos	Modelo	Aprendizado			Validação		Teste		
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
RNT com janelamento	VIII	3.62	0.35	0.8804	1.59	0.11	5.14	0.49	0.8446
RNT Elman	VIII	3.70	0.36	0.8968	1.35	0.09	5.25	0.48	0.8336
RNT FIR	III	4.05	0.46	1.1426			5.84	0.55	0.9596
RNT Jordan	VIII	3.64	0.35	0.8856	1.60	0.11	5.16	0.48	0.8401
Geoestatística		3.49	0.34	0.8527			4.48	0.46	0.7997

Tabela 5.60 Desempenho das previsões para o dreno "D192".

Métodos	Modelo	Aprendizado			Validação		Teste		
		MAPE	RMSE	UTHEIL	MAPE	RMSE	MAPE	RMSE	UTHEIL
RNT com	IV	4.69	0.29	0.9184	1.86	0.07	5.80	0.28	0.9649
janelamento									
RNT Elman	IV	4.71	0.29	0.9214	2.12	0.07	5.81	0.28	0.9671
RNT FIR	III	5.22	0.39	1.2414			6.92	0.33	1.1499
RNT Jordan	IV	4.69	0.29	0.9190	1.81	0.06	5.79	0.28	0.9652
Geoestatística		4.00	0.25	0.7981			4.52	0.23	0.8125

Tabela 5.61 Desempenho das previsões para o dreno "D193".

Em relação aos intervalos de confiança pode-se observar que:

 Os obtidos para as previsões geoestatísticas apresentaram o melhor desempenho, com grau de confiança acima do esperado e intervalos de confiança mais reais;

- Os obtidos pela técnica de saída do erro apresentam grau de confiança elevado, mas os intervalos são muitos "largos";
- Os obtidos pela técnica de *re-amostragem dos erros* não atenderam ao grau de confiança esperado.