SUMÁRIO

LISTA DE ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS 5

LISTA DE QUADROS 7

LISTA DE FIGURAS 8

1 – O Problema de Pesquisa

1.1 Introdução 13

1.2 Problema de investigação 15

1.3 Objetivos da pesquisa 18

1.4 Delineamento da tese 19

2 – Fundamentação Teórica

2.1 Sucessões cronológicas 21

2.1.1 Técnicas estatísticas de previsão.....22

2.1.2 Quanto ao Horizonte de Previsão 23

2.1.3 Os Métodos de Previsão 24

2.1.3.1 Técnicas Qualitativas 25

2.1.3.2 Técnicas Quantitativas 26

2.1.3.3 Análise da qualidade da previsão pontual realizada pelo método.....28

2.2 Análise de sucessões cronológicas 32

2.2.1 Fluxograma para análise de sucessões cronológicas 33

2.2.2 Estacionariedade de sucessões cronológicas 34

2.2.2.1 Teste de Estacionariedade 35

2.2.2.2 Funções de Autocorrelação 36

2.2.2.3 Teste de raízes unitárias – Tese de Dickey-Pantula 38

2.2.3 Teste de normalidade – Teste de Jarque-Bera 39

2.2.4 Teste para independência estatística – Teste BDS 40

2.2.5 Teste para dependência linear e não-linear.....43

2.2.5.1 Teste de McLeodi-Li 43

2.2.5.2 Teste para verificar a presença de heterocedasticidade condicionada.....44

2.2.5.3 Teste para detectar não-linearidade na média ou na variância – teste de Hsieh 45

2.2.6 Modelos Lineares – Metodologia de Box-Jenkins 46

2.2.6.1 Modelos Auto-Regressivos 49

2.2.6.2 Modelos de Médias Móveis 50

2.2.6.3 Modelos ARIMA 52

2.2.7 Modelos Não Lineares 55

2.2.7.1 Variância condicionada 58

2.2.7.2 Modelos não lineares na média 59

2.2.7.2.1 Modelos polinominais 59

2.2.7.2.2 Modelos bilineares 59

2.2.7.2.3 Modelos lineares por partes 60

2.2.7.2.4 Modelos EXPAR 60

2.2.7.3 Modelos não lineares na variância condicionada - Modelos GARCH 60

2.2.8 Redes neurais 64

2.2.8.1 Algoritmo de retropropagação 67

2.2.8.2 Redes neurais recorrentes 72

2.3 Da análise de fourier a análise de ondaletas 81

2.3.1 Análise de fourier 81

2.3.2 Análise de sucessões cronológicas via ondaletas 86

2.3.3 A Matemática das ondaletas 90

2.3.4 Aplicações de previsão baseado na decomposição de ondaletas 97

2.4 Processo de Geração de Dados – DGP 99

3 – Metodologia da Pesquisa

3.1 Metodologia 101

3.2 Previsão.....103

3.3 Desenvolvimento da pesquisa 105

4 – Resultados Experimentais

4.1Simulação de um modelo ARIMA-GARCH 109

4.2 Simulação de um modelo ARIMA 137

4.3 Simulação de um movimento browniano geométrico 153

4.4. Simulação de um modelo bilinear 159

4.5 Teste para o IBOVESPA 178

Conclusão 195

Referências 198

Apêndices

APÊNDICE A: Valores críticos para a estatística de DF e ADF 207

APÊNDICE B: Tipos de ondaletas 208

APÊNDICE C: Programas utilizados no trabalho 213

ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

Acrônimos

AIC	*Akaike Information Criteria* – Critério de Informação de Akaike
AR	Auto-regressivo
CWT	Transformada contínua de *wavelet*
GARCH	*Autoregressive Conditional Heterocedasticity* – Heterocedasticidade Autoregressiva Condicionada
ARIMA	Auto-regressivo Integrado de Média Móvel
BIC/SBC	*Bayesian Information Criteria* – Critério de Informação Bayesiano *Schwartz Bayesian Criteria*– Critério de Informação de Schwartz
BP	*Back Propagation* - Retropropagação
CI	Conjunto Informacional
FAC	Função de Auto-correlação
FACP	Função de Auto-correlação Parcial
FT	Transformada de Fourier
GARCH	*Generalized Autoregressive Conditional Heterocedasticity* – heterocedasticidade autoregressiva condicionada
GARCH-M	GARCH-in-Mean
LB	Estatística teste para estacionariedade
MA	*Moving Average* - Média Móvel
MAPE	*Mean Absolute Percentage Error* - erro absoluto médio percentual

MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MSE	*Mean Squared Error* - Erro Quadrático Médio
RB	Ruído Branco
RBI	Ruído Branco Independente
RBIN	Ruído Branco Independente Nominal
RMSE	*Root Mean Square Error* – raiz do erro quadrático médio
RMSPE	*Root Mean Squared Prediction Error* – raiz do erro quadrático médio de predição
RTRL	*Real Time Recurrent Learning* - aprendizado recorrente em tempo real
SIC	*Schwarz Information Criteria* – critério de informação de Schwarz

Símbolos enfatizados na pesquisa

X_t	t-ésima observação de uma série temporal
$\Psi(x)$	Ondaleta-mãe
$\Phi(x)$	Ondaleta-pai
R_t	Retorno da t-ésima observação de uma série temporal
ρ_k	função de autocorrelação na defasagem k

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Coeficientes de correlação e sua interpretação.....31

Quadro 2 Descrição do comportamento das funções FAC e FACP.....37

Quadro 3 Vantagens e desvantagens dos modelos ARCH.....61

Quadro 4 Resumo das estatísticas da qualidade da previsão pontual e do envelopamento das sucessões – modelo ARIMA-GARCH 175

Quadro 5 Resumo das estatísticas da qualidade da previsão pontual e do envelopamento das sucessões – modelo AR(1) 176

Quadro 6 Resumo das estatísticas da qualidade da previsão pontual e do envelopamento das sucessões – modelo bilinear com rede neural e retropropagação 176

Quadro 7 Resumo das estatísticas da qualidade da previsão pontual e envelopamento das sucessões - modelo bilinear com redes recorrentes 177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma proposto para análise de sucessões cronológicas 33

Figura 2 Modelo de um neurônio artificial 65

Figura 3 Rede neural com 3 camadas 68

Figura 4 Rede de Jordan 73

Figura 5 Rede de Elman 73

Figura 6 Rede de Elman estendida 74

Figura 7 Análise de Fourier no domínio do tempo e a STFT proposta por Garbor 85

Figura 8 Análise por ondaletas..... 85

Figura 9 Formas de ondas: senoidal e de uma ondaleta..... 87

Figura 10 Decomposição via ondaleta 89

Figura 11 Árvore de decomposição em 3 níveis de uma série temporal via ondaletas..... 89

Figura 12 Forma de ondaleta $\Psi_{0,0}(x), \Psi_{1,0}(x), \Psi_{2,0}(x)$ 94

Figura 13 Forma de ondaleta $\Psi_{0,1}(x), \Psi_{0,3}(x)$ 95

Figura 14 Fluxograma proposto para análise de sucessões cronológicas.....107

Figura 15 DGP para o modelo ARIMA(2,0,0)-GARCH(1,1).....110

Figura 16 Distribuições do modelo ARIMA(2,0,0)-GARCH(1,1) simulado.....111

Figura 17 Pré-processamento em 1º Nível da série original do modelo ARIMA(2,0,0)-GARCH(1,1).....113

Figura 18 Distribuições das sub-séries em 1º nível do modelo ARIMA-GARCH.....115

Figura 19 Comportamento da série ao longo do tempo para o modelo ARIMA-GARCH em 1 nível de pré-processamento.....117

Figura 20 Intervalo de previsão em 1º nível para redes recorrentes para a amostra de teste

do modelo ARIMA-GARCH.....122

Figura 21 Intervalo de previsão em 1º nível para redes recorrentes para os primeiros 10 elementos do modelo ARIMA-GARCH.....122

Figura 22 Intervalo de previsão em 1º nível feito por redes neurais com retropropagação do modelo ARIMA-GARCH.....122

Figura 23 Intervalo de previsão em 1º nível para redes neurais com retropropagação para os primeiros 10 elementos do modelo ARIMA-GARCH.....123

Figura 24 Intervalo de previsão em 1º nível feito por um modelo ARIMA-GARCH....123

Figura 25 Intervalo de previsão em 1º nível por um modelo ARIMA-GARCH para os primeiros 10 elementos.....123

Figura 26 Pré-processamento em 2º nível do modelo ARIMA-GARCH.....124

Figura 27 Distribuições das sub-séries em 2º nível do modelo ARIMA-GARCH.....126

Figura 28 Comportamento da série ao longo do tempo para o modelo ARIMA-GARCH em 2 níveis de pré-processamento.....127

Figura 29 Intervalo de previsão em 2º nível para redes recorrentes para a amostra de teste do modelo ARIMA-GARCH.....132

Figura 30 Intervalo de previsão em 2º nível para redes recorrentes para os primeiros 10 elementos do modelo ARIMA-GARCH.....132

Figura 31 Intervalo de previsão em 2º nível feito por redes neurais com retropropagação do modelo ARIMA-GARCH.....132

Figura 32 Intervalo de previsão em 2º nível para redes neurais com retropropagação para os primeiros 10 elementos do modelo ARIMA-GARCH.....133

Figura 33 Intervalo de previsão em 2º nível feito por um modelo ARIMA-GARCH....133

Figura 34 Intervalo de previsão em 2º nível por um modelo ARIMA-GARCH para os primeiros 10 elementos.....134

Figura 35 Distribuição dos resíduos do modelo ARIMA-GARCH previsto por um modelo ARIMA-GARCH, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....135

Figura 36 Distribuição dos resíduos do modelo ARIMA-GARCH previsto por redes neurais com retropropagação, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....136

Figura 37 Distribuição dos resíduos do modelo ARIMA-GARCH previsto redes neurais recorrentes, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....136

Figura 38 DGP para um modelo AR(1).....137

Figura 39 Distribuições do modelo AR(1) simulado.....138

Figura 40 Pré-processamento em 1º nível para o DGP do modelo AR(1).....139

Figura 41 Distribuição das sub-séries para o modelo AR(1).....140

Figura 42 Comportamento da série ao longo do tempo para o modelo ARIMA em 1 nível de pré-processamento.....141

Figura 43 Funções FAC e FACP para o DGP do modelo AR(1).....142

Figura 44 Previsão em 1º nível para o modelo AR(1) por para os primeiros 10 elementos.....144

Figura 45 Pré-processamento em 2º nível para o DGP do modelo AR(1).....144

Figura 46 Distribuição em 2º nível para o pré-processamento do DGP do modelo AR(1).....146

Figura 47 Comportamento da série ao longo do tempo para o modelo ARIMA em 2 níveis de pré-processamento.....147

Figura 48 Intervalo de previsão em 2º nível para o DGP do modelo AR(1).....150

Figura 49 Previsão dos primeiros 10 pontos para o 2º nível para o DGP do modelo AR(1).....150

Figura 50 Distribuição dos resíduos do modelo AR(1) previsto por um modelo ARIMA, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....152

Figura 51 Simulação de um movimento browniano geométrico.....153

Figura 52 Distribuições do movimento browniano geométrico simulado.....154

Figura 53 Pré-processamento em 1º nível do movimento browniano geométrico.....155

Figura 54 Distribuições em 1º nível do movimento browniano.....156

Figura 55 Pré-processamento em 2º nível do movimento browniano geométrico.....156

Figura 56 DGP para um modelo bilinear 159

Figura 57 Distribuições do modelo bilinear simulado.....160

Figura 58 Pré-processamento em 1º nível para o DGP do modelo bilinear.....162

Figura 59 Distribuição das sub-séries para o modelo bilinear.....163

Figura 60 Comportamento da série ao longo do tempo para o modelo bilinear em 1 níveis de pré-processamento.....164

Figura 61 Previsão em 1º nível para o modelo bilinear por redes neurais com retropropagação para os primeiros 10 elementos.....166

Figura 62 Previsão em 1º nível para o modelo bilinear por redes neurais com redes recorrentes para os primeiros 10 elementos.....167

Figura 63 Pré-processamento em 2º nível para o DGP do modelo bilinear.....167

Figura 64 Distribuição em 2º nível para o pré-processamento do DGP do modelo bilinear.....169

Figura 65 Comportamento da série ao longo do tempo para o modelo bilinear em 1 nível

de pré-processamento.....170

Figura 66 Intervalo de previsão em 1º nível para o DGP do modelo bilinear via RN com retropropagação.....172

Figura 67 Intervalo de previsão em 2º nível para o DGP do modelo bilinear via redes neurais com retropropagação.....172

Figura 68 Distribuição dos resíduos do modelo Bilinear previsto por redes neurais com retropropagação, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....174

Figura 69 Distribuição dos resíduos do modelo bilinear previsto redes neurais recorrentes, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....174

Figura 70 Valores nominais do IBOVESPA diário em pontos no período de 03/01/2000 a 29/10/2004.....178

Figura 71 Log-Retornos do IBOVESPA diário no período de 03/01/2000 a 29/10/2004.....179

Figura 72 Distribuição do IBOVESPA.....180

Figura 73 Pré-processamento em 1º nível para o IBOVESPA.....182

Figura 74 Distribuição das sub-séries para o IBOVESPA.....183

Figura 75 Comportamento da série ao longo do tempo para o IBOVESPA em 1 níveis de pré-processamento.....184

Figura 76 Pré-processamento em 2º nível para o IBOVESPA.....187

Figura 77 Distribuição em 2º nível para o pré-processamento do IBOVESPA.....189

Figura 78 Comportamento da série ao longo do tempo para o IBOVESPA em 2 níveis de pré-processamento.....190

Figura79 Distribuição dos resíduos do IBOVESPA previsto por redes neurais com retropropagação, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....194

Figura 80 Distribuição dos resíduos do modelo IBOVESPA previsto redes neurais recorrentes, em 1 e 2 níveis de pré-processamento.....194