



**Luciana Conceição Dias Campos**

**Modelo Estocástico Periódico baseado em  
Redes Neurais**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador : Prof. Marley M. B. R. Vellasco  
Co-Orientador: Prof. Juan Guillermo Lazo Lazo

Rio de Janeiro  
Setembro de 2010



**Luciana Conceição Dias Campos**

**Modelo Estocástico Periódico baseado em  
Redes Neurais**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada pela comissão examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marley M. B. R. Vellasco**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. Juan Guillermo Lazo Lazo**

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

**Prof. Alexandre Pinto Alves da Silva**

COPPE/UFRJ

**Prof. Valmir Carneiro Barbosa**

COPPE/UFRJ

**Prof. Joari Paulo da Costa**

ONS

**Prof. André Luís Marques Marcato**

UFJF

**Prof. Karla Tereza Figueiredo Leite**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Reinaldo Castro Souza**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de Setembro de 2010

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

### **Luciana Conceição Dias Campos**

Graduou-se em Informática na Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestrado na área de Engenharia de Sistemas e Computação na COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

#### Ficha Catalográfica

Campos, Luciana C. D.

Modelo Estocástico Periódico baseado em Redes Neurais / Luciana Conceição Dias Campos; orientador: Marley M. B. R. Vellasco; co-orientador: Juan Guillermo Lazo Lazo. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010.

v., 174 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Processos Estocásticos. 3. Redes Neurais Artificiais. 4. Séries de Afluências com Períodos Mensais. I. Vellasco, M. M. B. R.. II. Lazo, J. G. L.. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 510

Dedico esta tese primeiramente aos meus pais pelo apoio durante esses anos e também dedico ao amigo Murilo Pereira Soares, pois a sua ajuda foi muito importante para a realização deste trabalho.

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me iluminar colocando boas oportunidades e pessoas maravilhosas no meu caminho.

Ao CNPq, à PUC-Rio e ao laboratório ICA sou grata pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Agradeço muito à minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marley M. B. R. Vellasco, pela oportunidade de trabalharmos juntas, pela amizade, paciência, orientação, ajuda e incentivos na realização desta tese e por toda motivação que me foi dada em todos os meus momentos de dificuldades durante todos esses anos de trabalho.

Também sou grata ao meu co-orientador Dr. Juan G. L. Lazo pela ajuda e pelas idéias que enriqueceram o modelo desenvolvido nessa tese.

Agradeço aos meus pais e irmãos pelo apoio que me foi dado ao longo desta jornada, bem como a todos os familiares que torceram muito por mim.

Aos meus colegas e amigos da PUC-Rio e do ICA também devo agradecimentos pelo companheirismo e cooperação nesses anos de estudo.

Eu sou muito grata também aos outros tantos amigos que fazem parte da minha vida. Aos que me ajudaram com palavras de incentivo nos momentos de desânimo, sempre sendo uma fonte de energia e encorajamento durante esses anos de estudo. E também aos que me ofereceram companhia nos momentos de lazer, para esquecer um pouco as dificuldades e adquirir ânimo para continuar a tese.

Enfim, agradeço a todos que de uma forma ou outra me estimularam e ajudaram para eu conseguir concluir esse meu projeto de vida.

## Resumo

Campos, Luciana C. D.; Vellasco, M. M. B. R.; Lazo, J. G. L..

**Modelo Estocástico Periódico baseado em Redes Neurais.**

Rio de Janeiro, 2010. 174p. Tese de Doutorado — Departamento

de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de

Janeiro.

Processo Estocástico é um ramo da teoria da probabilidade onde se define um conjunto de modelos que permitem o estudo de problemas com componentes aleatórias. Muitos problemas reais apresentam características complexas, tais como não-linearidade e comportamento caótico, que necessitam de modelos capazes de capturar as reais características do problema para obter um tratamento apropriado. Porém, os modelos existentes apresentam limitação de aplicação a certos problemas ou por serem modelos lineares (cuja aplicação obtém resultados inconsistentes ou inadequados) ou porque necessitam de uma formulação complexa ou dependem de suposições a priori sobre o comportamento do problema, o que exige um conhecimento do problema em um nível de detalhamento que nem sempre se tem disponível. Isso motivou a elaboração de um modelo de processo estocástico baseado em redes neurais, de forma que seja genérico, para ser aplicado em uma gama de problemas envolvendo fenômenos de comportamento estocástico e, também, pode ser aplicado a fenômenos que apresentam características periódicas. Como as redes neurais artificiais são modelos não-lineares, simples de entendimento e implementação, capazes de capturar comportamentos de variados tipos de problemas, decidiu-se então utilizá-las como base do novo modelo proposto nessa tese, que é um modelo intrinsecamente não-linear, denominado Processo Estocástico Neural. Através das redes neurais desse processo estocástico, pode-se capturar adequadamente o comportamento da série histórica de problemas de fenômenos com características estocásticas e/ou periódicas. O objetivo é usar esse modelo para gerar séries temporais sintéticas, igualmente prováveis à série histórica, na solução de diversos tipos de problemas, como por exemplo os problemas que envolvem fenômenos climatológicos, econômicos, entre outros. Escolheu-se, como estudo de caso dessa tese, aplicar o modelo proposto no tratamento de afluições mensais sob o contexto do planejamento da operação do sistema hidrotérmico brasileiro. Os resultados mostraram que o Processo Estocástico Neural consegue gerar séries sintéticas com características similares às séries históricas de afluições mensais.

### **Palavras-chave**

Processos Estocásticos; Redes Neurais Artificiais; Séries de Afluições com Períodos Mensais;

## Abstract

Campos, Luciana C. D.; Vellasco, M. M. B. R.; Lazo, J. G. L..

**Periodic Stochastic Model based on Neural Networks.**

Rio de Janeiro, 2010. 174p. Doctoral Thesis — Departamento de

Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de

Janeiro.

Stochastic Process is a branch of probability theory which defines a set of templates that allow the study of problems with random components. Many real problems exhibit complex characteristics such as nonlinearity and chaotic behavior, which require models capable of capture the real characteristics of the problem for a appropriate treatment. However, existing models have limited application to certain problems or because they are linear models (whose application gets results inconsistent or inadequate) or because they require a complex formulation or depend on a priori assumptions about the behavior of the problem, which requires a knowledge the problem at a level of detail that there is not always available. This motivated the development of a model stochastic process based on neural networks, so that is generic to be applied in a range of problems involving highly stochastic phenomena of behavior and also can be applied to phenomena that have periodic characteristics. As artificial neural networks are non-linear models, simple to understand and implementation, able to capture behaviors of varied types problems, then decided to use them as the basis of new model proposed in this thesis, which is an intrinsically non-linear model, called the Neural Stochastic Process. Through neural networks that stochastic process, can adequately capture the behavior problems of the series of phenomena with features highly stochastic and / or periodical. The goal is to use this model to generate synthetic time series, equally likely to historical series, in solution of various problems, eg problems phenomena involving climatology, economic, among others. It was chosen as a case study of this thesis, applying the model proposed in the treatment of monthly inflows in the context of operation planning of the Brazilian hydrothermal system. The Results showed that the process can Stochastic Neural generate synthetic series of similar characteristics to the historical monthly inflow series.

## Keywords

Stochastic Processes; Neural Network; Inflows Series with Monthly Periods;

# Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	16
1.2	Objetivo	18
1.3	Descrição do Trabalho	19
1.4	Contribuição do Trabalho	21
1.5	Estrutura da Tese	22
2	Fundamentos Teóricos	24
2.1	Processos Estocásticos	24
2.2	Método de Amostragem Quase Monte Carlo	36
2.3	Testes de Hipótese	38
2.4	Redes Neurais Artificiais	44
2.5	Algoritmos Genéticos	54
2.6	Resumo	60
3	Processo Estocástico Neural	61
3.1	Descrição do Processo Estocástico Neural	62
3.2	Determinação da estrutura do Processo Estocástico Neural	66
3.3	Estimação dos parâmetros do Processo Estocástico Neural	68
3.4	Validação dos resíduos gerados	72
3.5	Geração de cenários através do processo estocástico neural	75
3.6	Resumo	76
4	O Processo Estocástico Neural no Tratamento de Séries de Afluências Mensais	77
4.1	Processo Estocástico Neural na Modelagem de Séries Hidrológicas	80
4.2	Mantendo a correlação espacial entre os Subsistemas na série de Afluência Mensal	91
4.3	Resumo	98
5	Estudo de Casos	100
5.1	Análise do ajuste do modelo para a série de Energia Natural Afluente de cada Subsistema	101
5.2	Análise dos Cenários Sintéticos de Energia Natural Afluente	106
5.3	Resumo	143
6	Conclusão	144
6.1	Trabalhos Futuros	146
	Referências Bibliográficas	147
A	Resultados Adicionais	154



A.1	Configurações de Redes Neurais Artificiais escolhidas pelas Medidas Mensais de Desempenho para o modelo PEN versão original	154
A.2	Configurações de Redes Neurais Artificiais escolhidas pelas Medidas Mensais de Desempenho para o modelo PEN com Redes Neurais de 4 saídas	165
A.3	Detalhes Complementares da Análise de Cenários Sintéticos de Energia Natural Afluyente	168

## Lista de figuras

2.1	Processo Estocástico e Série Temporal [62]	26
2.2	Diagrama Operacional do modelo Box e Jenkins	28
2.3	Seqüências de Halton: (a) dimensão 14x15 (b) dimensão 20x21	37
2.4	Comparação de pontos de uma seqüência pseudo aleatória e seqüência Quase Monte Carlo de Sobol.	37
2.5	Modelo simplificado de um neurônio biológico [22].	45
2.6	Esquema de um neurônio artificial.	46
2.7	Exemplo de uma rede neural <i>feedforward</i> .	47
2.8	Exemplo de uma rede neural recorrente.	48
2.9	Monitoramento da função de custo de validação ocasionando um "early stopping" no treinamento de uma rede neural [28].	53
2.10	RNA <i>feedforward</i> implementada como um modelo auto-regressivo de ordem 4 [55].	55
2.11	Um indivíduo de uma população de AG	56
2.12	Recombinação genética de dois cromossomos	58
2.13	Algoritmo Genético Genérico	59
3.1	Componente Estocástica do Processo Estocástico Neural	62
3.2	Encadeamento entre as CEs do Processo Estocástico Neural	62
3.3	Rede Neural do PEN de ordem $p_m$	64
3.4	Neurônio da camada oculta de uma rede do PEN de ordem $p_m$	64
3.5	Neurônio de saída de uma rede do PEN com $l_m$ neurônios na camada oculta	64
3.6	Encadeamento entre as entradas/saídas das Componentes Estocásticas do Processo Estocástico Neural	66
3.7	Treinamento das Redes Neurais do Processo Estocástico Neural	69
3.8	Validação das Redes Neurais do Processo Estocástico Neural	70
3.9	Construção do Cenário de Validação	71
3.10	Interrupção do Treinamento Coletiva	73
3.11	Interrupção do Treinamento Individual por RNA	74
3.12	Geração de cenários no PEN	76
4.1	Modelagem de Sistemas Hidrotérmicos no Planejamento da Operação Energética	79
4.2	Séries Históricas de Energia Natural Afluente	80
4.3	Dados Anuais das Séries Históricas de ENA	81
4.4	Modelagem do Processo Estocástico Neural no tratamento de Séries de Afluências Mensais	82
4.5	Diagrama do Processo Estocástico Neural na geração de Séries Sintéticas de Afluências Mensais	83
4.6	Unificação dos Padrões de Dados de Treinamento e Validação	87
4.7	Geração do Cenário Unificado	88
4.8	Rede Neural de Janeiro com 4 saídas	97

4.9	Neurônio da camada oculta da rede neural de 4 saídas	97
5.1	Exemplo de distribuição de Probabilidade e seus parâmetros	105
5.2	p-valor do Teste $t$	107
5.3	Envoltória dos cenários gerados no PAR(p)	129
5.4	Envoltória dos cenários gerados no PEN( $p, l$ )	130
5.5	Envoltória dos cenários do Subsistema 3 sem <i>outliers</i>	131
5.6	Desvio Padrão dos cenários gerados no PAR(p)	132
5.7	Desvios Padrão dos cenários gerados no PEN( $p, l$ )	134
5.8	Desvios Padrão dos cenários do Subsistema 3 sem <i>outliers</i>	135
5.9	Correlação Anual dos cenários gerados no PAR(p)	137
5.10	Correlação Anual dos cenários gerados no PEN( $p, l$ )	139
5.11	Custos Totais da Operação Energética com os Cenários do PEN	142
5.12	Custos Totais da Operação Energética com os Cenários do PAR(p)	143

## Lista de tabelas

2.1	Resultados de um teste de Hipótese.	38
5.1	Parte do arquivo com resultados da estimativa do PEN	102
5.2	Configurações de RNA escolhidas com as medidas de desempenho de cenários	103
5.3	Ordem dos meses definida para o PAR(p) de cada subsistema	105
5.4	Análise dos cenários gerados no PAR(p)	108
5.5	Análise dos cenários gerados no $PEN(p, l)$ do subsistema Sudeste/Centro-Oeste	110
5.6	Análise dos cenários gerados no $PEN(p, l)$ do subsistema Sul	111
5.7	Análise dos cenários gerados no $PEN(p, l)$ do subsistema Nordeste	113
5.8	Análise dos cenários gerados no $PEN(p, l)$ do subsistema Norte	114
5.9	Parâmetros dos Modelos $PEN(p, l)$	117
5.10	Comparação dos testes de aderência dos cenários gerados no $PEN(p, l)$ e no PAR(p)	117
5.11	Análise dos cenários gerados no $PEN_{log}(p, l)$ do subsistema Sudeste/Centro-Oeste	119
5.12	Análise dos cenários gerados no $PEN_{log}(p, l)$ do subsistema Sul	121
5.13	Análise dos cenários gerados no $PEN_{log}(p, l)$ do subsistema Nordeste	122
5.14	Análise dos cenários gerados no $PEN_{log}(p, l)$ do subsistema Norte	123
5.15	Configurações das RNAs do modelo $PEN_{4Out}$ escolhidas com as medidas de desempenho de cenários	125
5.16	Análise dos cenários gerados pelo modelo $PEN_{4Out}$	128
A.1	Configurações de RNAs escolhidas para o subsistema SudesteCentro-Oeste	157
A.2	Configurações de RNAs escolhidas para o subsistema Sul	159
A.3	Configurações de RNAs escolhidas para o subsistema Nordeste	162
A.4	Configurações de RNAs escolhidas para o subsistema Norte	165
A.5	Configurações de RNAs do modelo $PEN_{4Out}$	168
A.6	Aderências dos cenários gerados no PAR(p)	171
A.7	Aderências dos cenários gerados no PEN	174

*Ama-se mais o que se conquista com esforço.*

**Benjamin Disraeli**, *Escritor e político britânico.*