UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SERGIO LUIS YONEDA

ANÁLISE HIDROLÓGICA UTILIZANDO REDES NEURAS
PARA PREVISÃO DE SÉRIES DE VAZÕES

SÃO CARLOS
2014

SERGIO LUIS YONEDA

ANÁLISE HIDROLÓGICA UTILIZANDO REDES NEURAIS PARA PREVISÃO DE SÉRIES DE VAZÕES

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Y55a Yoneda, Sergio Luis
Análise hidrológica utilizando redes neurais para
previsão de séries de vazões / Sergio Luis Yoneda;
orientador Rogério Andrade Flauzino. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Estações fluviométricas. 2. Inventários de rios.
3. Redes neurais artificiais. 4. Séries de vazões. 5.
Usinas hidrelétricas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **SERGIO LUIS YONEDA**.

Título da dissertação: "Análise hidrológica utilizando redes neurais para previsão de séries de vazões".

Data da defesa: 20/03/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Rogério Andrade Flauzino (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Sérgio Kurokawa**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Ilha Solteira)

Aprovado

Prof. Dr. **José Alfredo Covolan Ulson**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Bauru)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Dedico este trabalho a minha família, em especial a
minha esposa Viviane por seu apoio e incentivo
incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao meu orientador Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino, pelo voto de confiança e por todo o apoio e orientação fornecido para finalização do trabalho.

A ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica e seus diretores por colaborar com esse trabalho através de seus programas de incentivo a qualificação de profissionais, sem os quais seria muito difícil a conclusão desse trabalho.

Ao meu chefe Odenir José dos Reis e colegas da ANEEL por sua compreensão e incentivo apoiando desde o início esse minha jornada.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que de forma direta ou indireta, me ajudaram e contribuíram para a minha evolução pessoal e profissional.

A todos os amigos e pessoas que me apoiaram em São Carlos contribuindo de alguma maneira para mais uma experiência de vida.

A Deus, pois sem ele nada seria possível.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

YONEDA, S. L. (2014). Análise Hidrológica Utilizando Redes Neurais para Previsão de Séries de Vazões. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

O estudo de inventário tem por objetivo estimar o potencial hidroelétrico de rios ou bacias, analisando várias alternativas propostas de partição de quedas, sendo que cada alternativa contém um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos. Essas alternativas são então estudadas individualmente para definição da alternativa ótima, ou seja, a que tem melhor custo benefício e ao mesmo tempo cause menos danos ambientais. Para essa análise necessitamos calcular a potência de cada aproveitamento específico, assim como a energia gerada, para isso então precisamos conhecer a vazão do rio em estudo, no local desses aproveitamentos. Como a vazão dos rios varia com o tempo, pois depende de variáveis como clima, geologia dos solos, desmatamento, entre outras, se recomenda usar nos cálculos séries longas de vazões médias com no mínimo 30 anos de dados, o problema é que em muitos casos não temos essas séries ou temos séries menores e incompletas, nesse caso então necessitamos estimar os valores ausentes e ruidosos utilizando os dados de estações fluviométricas próximas, para depois transportá-las para o aproveitamento em estudo, para isso utilizamos de técnicas estatísticas de correlação. A ideia nesse trabalho é de utilizarmos redes neurais artificiais ao invés das técnicas convencionais e comparar os resultados obtidos.

Palavras-chaves: Estações fluviométricas, Inventários de rios, Redes neurais artificiais, Séries de vazões, Usinas hidrelétricas.

ABSTRACT

YONEDA, S. L. (2014). *Hydrologic analysis using Artificial Neural Networks for time series forecasting streamflow*. (Master Degree) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

The inventory study aims to estimate the hydropower potential of rivers or basins , analyzing several alternative proposals for partition of falls , each of which contains a set of alternative hydroelectric developments . These alternatives are then individually analyzed to define the optimal alternative, namely that which has the best cost benefit while causing less environmental damage. For this analysis we need to calculate the power of each specific use, as well as the energy generated for that then we need to know the flow of the river under study , the location of these usages. As the river flow varies with time because it depends on variables such as climate , geology, soils , deforestation , among others , we recommend using the long series of calculations mean flow at least 30 years of data , the problem is that in many cases we do not have these series or have smaller and incomplete series , in this case then we need to estimate the missing values and noisy data using next gauged stations , and then transport them to use in the study , for this we use statistical correlation techniques . The idea is that we use work instead of the conventional Artificial Neural Network techniques and compare the results.

Keywords: Artificial neural network, Hydroelectric power plants, Stream gauged stations, Inventories of rivers, Stream flow series.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Horizonte decenal de projeções econômicas e demográficas no Brasil	2
Figura 1.2	Consumo per capita de eletricidade no mundo	2
Figura 1.3	Matriz de energia elétrica no Brasil e no mundo	3
Figura 1.4	Aproveitamento do potencial hidroelétrico no Brasil e no mundo	4
Figura 1.5	Competitividade entre as fontes primárias para produção de energia elétrica	5
Figura 1.6	Evolução da capacidade do parque gerador brasileiro.....	5
Figura 1.7	Expansão da capacidade hidráulica	6
Figura 1.8	Evolução do marco regulatório.....	7
Figura 1.9	Evolução da capacidade instalada de PCH	8
Figura 2.1	Estudos necessários para implantação de uma usina hidroelétrica.....	11
Figura 2.2	Exemplo de partição de queda	13
Figura 2.3	Carta cartográfica na escala 1:100.000 na região do rio Jequitinhonha	14
Figura 2.4	Fotos aéreas na região do rio Jequitinhonha.....	14
Figura 2.5	Curvas de nível na região do rio Jequitinhonha.....	15
Figura 2.6	Mapa hidrológico do estado do Mato Grosso	16
Figura 2.7	Metodologia utilizada para conversão de chuva em vazão.....	18
Figura 2.8	Curva de regionalização de vazões médias de cheia em relação a área de drenagem	19
Figura 2.9	Simulação de motorização da PCH III no rio Formoso.....	21
Figura 2.10	Orçamento para construção da PCH III no rio Formoso	22
Figura 2.11	Comparação do ICB x Índice Ambiental Negativo, obtidos no estudo de inventário do rio Sararé.....	25
Figura 2.12	Série de vazões médias mensais e produção média mensal de energia da PCH III no rio Formoso	26
Figura 3.1	Localização dos postos fluviométricos na bacia do rio Urucua.....	30
Figura 3.2	Limnigrama das cotas médias diárias do rio Urucua nos postos fluviométricos Santo Inácio e Vila Urucua.....	32

Figura 3.3	Limnigrama das cotas médias diárias do ribeirão Conceição no posto fluviométrico Fazenda Conceição	32
Figura 3.4	Relações cota x descarga do rio Urucuia no posto fluviométrico Vila Urucuia.....	33
Figura 3.5	Relações cota x descarga coletadas e revisadas do rio Urucuia no posto fluviométrico Vila Urucuia	34
Figura 3.6	Correlação das vazões médias mensais do rio Urucuia nos postos fluviométricos Santo Inácio e Vila Urucuia	36
Figura 3.7	Correlação das vazões médias mensais do ribeirão Conceição no posto fluviométricos Fazenda Conceição e as vazões incrementais entre os postos Santo Inácio e Vila Urucuia.....	37
Figura 3.8	Hidrograma das vazões médias mensais do ribeirão Conceição no posto fluviométricos Fazenda Conceição	39
Figura 3.9	Curva de permanência das vazões médias mensais do ribeirão Conceição no posto fluviométricos Fazenda Conceição	40
Figura 3.10	Localização dos eixos dos aproveitamentos identificados no ribeirão Santa Cruz	41
Figura 3.11	Permanência das vazões médias mensais nos aproveitamentos identificados no ribeirão Santa Cruz.....	43
Figura 3.12	Bacia da região do rio Negro	44
Figura 3.13	Gráfico temporal de dados das estações fluviométricas da região do rio Negro	45
Figura 3.14	Bacia do rio Sararé	46
Figura 3.15	Bacia do rio Formoso	50
Figura 3.16	Bacia do rio Cupari	54
Figura 4.1	Representação de um neurônio biológico	62
Figura 4.2	Esquema do neurônio artificial	63
Figura 4.3	Função degrau (binária)	65
Figura 4.4	Função degrau (bipolar).....	65
Figura 4.5	Função rampa.....	66
Figura 4.6	Função sigmóide	66
Figura 4.7	Função tangente hiperbólica	67
Figura 4.8	Representação de camadas de uma rede neural artificial.....	68
Figura 4.9	Representação de uma rede FeedForward (camada única).....	69
Figura 4.10	Representação de uma rede FeddForward (muticamadas)	69
Figura 4.11	Representação de uma rede recorrente	70
Figura 5.1	Comportamento do erro relativo médio em função do número de neurônios na camada escondida.....	76

Figura 5.2	Comportamento do erro relativo médio para os dados de teste em função do numero de memórias.....	77
Figura 5.3	Comportamento do erro absoluto médio em função do número de parâmetros livres para RNA's com duas camadas	80
Figura 5.4	Caso I.....	89
Figura 5.5	Caso II	89
Figura 5.6	Caso III	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Resumo dos componentes sínteses obtidos no estudo ambiental do rio Sararé	24
Tabela 3.1	Postos fluviométricos na região do ribeirão Santa Cruz	30
Tabela 3.2	Série de vazões médias mensais no posto Fazenda Conceição	35
Tabela 3.3	Série de vazões médias mensais preenchidas no posto Fazenda Conceição	38
Tabela 3.4	Características hidrológicas dos aproveitamentos identificados no ribeirão Santa Cruz	42
Tabela 3.5	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Perto Bocaina	44
Tabela 3.6	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Fazenda rio Negro	45
Tabela 3.7	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Pontes e Lacerda	47
Tabela 3.8	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Vila Bela da Santíssima Trindade	48
Tabela 3.9	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Pimenteiras	49
Tabela 3.10	Estações fluviométricas da região do rio Formoso.....	50
Tabela 3.11	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Cachoeira	51
Tabela 3.12	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Tabirapuã	52
Tabela 3.13	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica São José do Sepotuba	53
Tabela 3.14	Estações fluviométricas da região do rio Cupari	55
Tabela 3.15	Série de vazões médias mensais da estação fluviométrica Creporizão	55

Tabela 5.1	Dados históricos de vazão do rio Santa Cruz	73
Tabela 5.2	Dados para exemplificar a criação dos padrões de treinamento para as redes neurais artificiais	74
Tabela 5.3	Dados para teste das 42 RNA's de uma camada	78
Tabela 5.4	Dados para teste das 50 RNA's de duas camadas	81
Tabela 5.5	Caso 1 - Dados do rio Santa Cruz com supressão de alguns dados.	82
Tabela 5.6	Caso 2 - Dados do rio Santa Cruz com supressão de alguns dados.	83
Tabela 5.7	Caso 3 - Dados do rio Santa Cruz com supressão de alguns dados.	84
Tabela 5.8	Caso 1, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pela rede neural.	84
Tabela 5.9	Caso 2, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pela rede neural.	85
Tabela 5.10	Caso 3, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pela rede neural.	86
Tabela 5.11	Caso 1, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pelas técnicas convencionais.	86
Tabela 5.12	Caso 2, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pelas técnicas convencionais.	87
Tabela 5.13	Caso 3, tabela do rio Santa Cruz com dado faltantes estimados pelas técnicas convencionais.	88

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	01
INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO	01
1.1. PANORAMA DE NOVOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO HIDRÁULICA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	01
1.1.1. PROJEÇÕES DE AUMENTO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	01
1.1.2. MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	03
1.1.3. EXPANSÃO DA GERAÇÃO HIDRÁULICA NO BRASIL	05
1.1.4. INCENTIVOS A GERAÇÃO HIDRÁULICA NO BRASIL	06
1.1.5. REQUISITOS PARA PROPOSIÇÃO DE UM NOVO EMPREENDIMENTO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA	09
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	10
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	10
CAPÍTULO 2	11
ASPECTOS REFERENTES A PROPOSIÇÃO DE NOVOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
2.1. PROCESSO DE PROPOSIÇÃO DE UM NOVO EMPREENDIMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	11
2.2. ESTUDOS DE INVENTÁRIO	12
2.2.1. ESTUDOS CARTOGRÁFICOS / TOPOGRÁFICOS	13
2.2.2. ESTUDOS GEOLÓGICOS	15
2.2.3. ESTUDOS HIDROLÓGICOS	17
2.2.3.1. ESTUDOS DE VAZÃO MÉDIA	17
2.2.3.2. ESTUDOS DE CHEIA	18
2.2.3.3. ESTUDOS SEDIMENTOLÓGICOS	19
2.2.4. ESTUDOS ENERGÉTICOS	20
2.2.5. ESTUDOS ECONÔMICOS	22
2.2.6. ESTUDOS AMBIENTAIS	23
2.2.7. SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS SELECIONADAS	24

2.3	USO DA SÉRIE HISTÓRICA PARA GERAÇÃO DE POTENCIAL DE GERAÇÃO	26
2.4	ASPECTOS DO PORQUE AS SÉRIES DE VAZÕES SÃO CORROMPIDAS	27
2.5	CONCLUSÕES	28

CAPÍTULO 3.....29

METODOLOGIA CONVENCIONAL PARA ESTIMAÇÃO DE VAZÕES

3.1	INTRODUÇÃO	29
3.2	ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA	31
3.3	PREENCHIMENTO DAS SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS MENSAIS	35
3.4	ANÁLISE DO REGIME FLUVIAL	39
3.5	TRANSPOSIÇÃO DAS SÉRIES DE VAZÕES MÉDIAS MENSAIS PARA OS APROVEITAMENTOS IDENTIFICADOS	40
3.6	EXEMPLOS DE SÉRIES DE VAZÕES CORROMPIDAS	43
3.6.1.	INVENTÁRIO DO RIO NEGRO	43
3.6.2.	INVENTÁRIO DO RIO SARARÉ	46
3.6.3.	INVENTÁRIO DO RIO FORMOSO	49
3.6.4.	INVENTÁRIO DO RIO CUPARI	54
3.7	CONCLUSÕES	56

CAPÍTULO 4.....59

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

4.1.	INTRODUÇÃO	59
4.2.	HISTÓRICO RESUMIDO	60
4.3.	O NEURÔNIO BIOLÓGICO	61
4.4.	O NEURÔNIO ARTIFICIAL DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	63
4.5.	FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO DO NEURÔNIO ARTIFICIAL	64
4.5.1.	FUNÇÃO DEGRAU (BINÁRIA)	64
4.5.2.	FUNÇÃO DEGRAU (BIPOLAR)	65
4.5.3.	FUNÇÃO RAMPA	65
4.5.4.	FUNÇÃO SIGMÓIDE	66
4.5.5.	FUNÇÃO TANGENTE HIPERBÓLICA	67
4.6.	CAMADAS DE UMA REDE NEURAL ARTIFICIAL	67
4.7.	TOPOLOGIAS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	68
4.8.	TREINAMENTO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	71
4.9.	CONCLUSÕES	72

CAPÍTULO 5.....73

ESTIMAÇÃO DE VAZÕES EM SÉRIES HISTÓRICAS

5.1.	APRESENTAÇÃO DOS DADOS QUE SERÃO ADOTADOS	73
5.2.	DETALHAMENTO DO PROBLEMA E CONSTITUIÇÃO DOS CONJUNTOS	

DE TREINAMENTO	74
5.3. ASPECTOS METODOLÓGICOS RELACIONADOS AO PROJETO DE REDES NEURAIS	75
5.3.1. PROJETO DE RNA COM UMA CAMADA OCULTA PARA RECUPERAÇÃO DE DADOS EM SÉRIES HIDROLÓGICAS	75
5.3.2. PROCESSO DE TREINAMENTO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	76
5.3.3. PROJETO DE RNA COM DUAS CAMADAS OCULTA PARA RECUPERAÇÃO DE DADOS EM SÉRIES HIDROLÓGICAS	79
5.3.4. PROCESSO DE TREINAMENTO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS	80
5.4. APLICAÇÃO DA REDE NEURAL EM CASOS SIMULADOS COMPARADOS COM A METODOLOGIA CONVENCIONAL	82
5.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	88
CAPÍTULO 6	91
CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	
6.1. CONCLUSÕES	91
6.2. TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO

1.1 PANORAMA DE NOVOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO HIDRÁULICA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.

A energia elétrica é um fator crítico para o desenvolvimento, os empreendimentos em geração precisam ser planejados no longo prazo, de forma a adequar os investimentos que devem ocorrer com antecedência prevendo as necessidades de demanda de energia no País. No caso de usinas hidroelétricas o prazo médio para início do fornecimento de energia, desde o projeto, passando pela aprovação, licenciamento ambiental e construção está em torno de 10 anos. Cabe então ao governo fazer esse planejamento de longo prazo e também criar incentivos para que o setor privado invista no setor elétrico, de forma a atingir o objetivo final que é garantir o fornecimento de energia elétrica no futuro, evitando riscos de desabastecimentos, e sem comprometer o crescimento da economia. (LEITE, 2007)

1.1.1 PROJEÇÕES DE AUMENTO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA.

Na atual estrutura da economia internacional, os países emergentes deverão ser os maiores consumidores de energia num futuro próximo, pois vários estudos constataam uma estabilização no consumo de energia nos países desenvolvidos, assim como um crescimento do uso de energia elétrica nos países em desenvolvimento, na coerência destes estudos o Brasil, como país emergente, deve requerer energia em maior intensidade para as próximas décadas.

De acordo com SILVA (2010) além da perspectiva mundial, o governo brasileiro projeta para as próximas décadas um aumento do PIB per capita brasileiro, que deve ocorrer, mesmo com a diminuição do ritmo de crescimento populacional, como se evidencia na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Horizonte decenal de projeções Econômicas e Demográficas no Brasil

Fonte: Ministerio de Minas e Energia (2008).

Um fator importante a mencionar é que o Brasil mesmo como sexta economia mundial, ainda possui um baixo consumo de energia elétrica per capita, conforme mostra a Figura 1.2. Isso pode ser explicado em partes pelo fato de que no Brasil milhões de domicílios ainda não tem acesso a luz elétrica e muitos daqueles que tem acesso consomem pouco. Comparado com outros países, o Brasil está abaixo da média, mostrando haver uma demanda reprimida de energia elétrica. (ZIMMERMANN, 2008)

Figura 1.2 – Consumo per capita de eletricidade no mundo

Fonte: Ministerio de Minas e Energia (2003).

Portanto na conjuntura econômica projetada para a próxima década e com as características atuais do país, deverá haver no Brasil um aumento significativo da demanda de energia elétrica, nesse sentido o governo e a sociedade brasileira necessitarão investir de maneira intensa na oferta de energia elétrica para evitar futuros apagões. O Ministério de Minas e Energia, que é responsável pelo planejamento de longo prazo, prevê uma necessidade de expansão de 50.700 MW da capacidade instalada para os próximos 10 anos.

1.1.2. MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A energia hidráulica continua dominando a oferta de energia elétrica no Brasil conforme mostra a Figura 1.3, representando 77,3% do total. Já no mundo sua representatividade é bem menor com 16,0%. Isso pode ser explicado, segundo MUNHOZ (2008), pelo fato do Brasil possuir um dos maiores potenciais hidráulicos do mundo, aproximadamente 10% do potencial hidráulico tecnicamente aproveitável, perdendo apenas para China com 13% e Rússia com 12%.

Figura 1.3 – Matriz de energia elétrica no Brasil e no mundo

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2008).

De acordo com JUNIOR (2009) um fator importante a ser destacado no Brasil é que somente 30% desse potencial já foi aproveitado, ao contrário de países como a França que já aproveitaram 100%, conforme mostrado na Figura 1.4. Cabe observar que a maior parte desse potencial remanescente está concentrado nas regiões Norte e Centro-Oeste.

Figura 1.4 – Aproveitamento do Potencial Hidroelétrico no Brasil e no mundo

Fonte: Eletrobras(2002).

Outro fator a destacar é a competitividade da energia hidráulica comparada com as outras fontes de energia, que atualmente está na faixa de R\$ 80,00/MWh, enquanto por exemplo a energia proveniente de térmicas movidas a óleo diesel está na faixa de R\$780,00/MWh. A Figura 1.5 compara o preço de várias fontes de energia no Brasil.

Figura 1.5 – Competitividade entre as fontes primárias para produção de energia elétrica

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2009).

1.1.3. Expansão da Geração Hidráulica no Brasil

Segundo TOLMASQUIM (2009) o Plano Decenal brasileiro feito pelo governo prevê a expansão da oferta de energia elétrica em 63,5 GW, com o objetivo de atender as projeções de crescimento da economia. Para isso estão sendo incentivados investimentos em várias fontes de energia como por exemplo as alternativas (eólica, biomassa e PCHs - Pequenas Centrais Hidroelétricas), as Usinas térmicas e as UHEs - Usinas Hidroelétricas, sendo que pela característica da matriz energética brasileira, aproximadamente 55% da expansão deve ser atendida por UHEs, conforme mostra a Figura 1.6.

Figura 1.6 – Evolução da capacidade do parque gerador brasileiro

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2010).

Na Figura 1.7 são mostradas algumas das UHEs que fazem parte do plano de expansão decenal brasileiro, sendo que a principal é a Usina de Belo Monte no rio Xingu, com 11.233 MW de potência instalada.

Figura 1.7 – Expansão da geração hidráulica

Fonte: PDE 2019, Aneel

1.1.4. Incentivos a Geração Hidráulica no Brasil

O atual modelo do setor elétrico brasileiro delegou para a iniciativa privada a função de investir em energia, ficando o governo responsável por criar políticas que incentivem esse investimento buscando sempre a modicidade tarifária para o consumidor, sem prejudicar a atratividade de investimento, para isso utiliza a intervenção da regulação, (SIMABUKU, 2008). O setor elétrico tem uma estrutura institucional complexa, composta por vários órgãos, tais quais o MME – Ministério Minas e Energia, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, o ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, a CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica e a EPE – Empresa de Pesquisa Energética, sendo que cada um tem uma função específica, sempre na busca do interesse público. No que tange as usinas hidroelétricas, houve nos últimos anos uma evolução do marco regulatório, sendo criados vários benefícios para as PCHs conforme mostrado na Figura 1.8, com o objetivo de incrementar investimentos nessa área. (SANTANA, 2009)

Figura 1.8 – Evolução do marco regulatório

Fonte: Aneel (2010)

Os principais incentivos criados foram os seguintes:

- Desconto na TUSD/TUST - Tarifas de uso do sistema de distribuição e transmissão: as PCHs tem desconto de 50% nas tarifas de uso dos sistemas de distribuição e de transmissão, que incidem no consumo de energia comercializada pelo aproveitamento. Os consumidores livres podem comprar energia de PCHs com desconto de pelo menos 50%.
- Uso de instalações compartilhadas de geração: Permitem o compartilhamento de custos de acesso a rede básica entre dois ou mais agentes para conexão compartilhada, dividindo os custos de acesso. Tem direito a compor uma conexão compartilhada UHEs, PCHs e UTEs – Usinas Térmicas (biomassas).
- Geração Distribuída: A contratação de GD é um dos meios que a Distribuidora tem para suprir seu mercado. Podem ser contratadas PCHs conectadas diretamente ao sistema de distribuição do comprador.
- PROINFA - Programa de incentivo as fontes alternativas: as PCHs podem participar do programa de incentivo as fontes alternativas.

- Uso do bem público: as PCHs não precisam pagar para explorar o potencial hidráulico; não necessitando de leilão, apenas uma autorização.
- CFURH - Compensação financeira pelo uso dos recursos hídricos: Isenção relativa ao encargo de compensação financeira.
- Isenção de aplicação em pesquisa e desenvolvimento: não tem obrigação de destinar recursos para programas de pesquisa no valor de 0,25% da receita operacional líquida.
- Podem participar do MRE - Mecanismo de realocação de energia.

De acordo com MARTINS (2010) como consequência desses incentivos houve um aumento nos projetos de PCHs enviados a ANEEL, que é o órgão responsável pela sua aprovação, através da SGH - Superintendência de Gestão e Estudos Hidroenergéticos. Apesar da dificuldade gerada por essa grande demanda, o objetivo principal foi alcançado possibilitando um aumento da capacidade instalada em PCHs conforme mostrado na Figura 1.9.

Figura 1.9 – Evolução da capacidade instalada de PCH segundo PIGATTO (2010)

Fonte: Aneel (2010)

1.1.5. Requisitos para proposição de um novo empreendimento de geração hidráulica

No Brasil, conforme exposto anteriormente, a opção pela energia hidráulica continua sendo interessante devido a sua abundância, seu custo competitivo, incentivos feitos pelo governo, e mesmo com o aumento das exigências feitas pelos órgãos ambientais (principalmente nas grandes Usinas). Esses empreendimentos necessitam de uma série de estudos para serem analisados e aprovados pela ANEEL, antes da usina entrar em operação. Um dos mais importantes é o Estudo de Inventário no qual se define o potencial hidroelétrico de um rio. O estudo de inventário por sua vez é composto de vários outros estudos, sendo os principais o cartográfico/topográfico, que basicamente informa a declividade do rio (queda) e o hidrológico que permite obter a série de vazões média do rio, nos locais dos aproveitamentos identificados (ABIB, 2008). Esses estudos são utilizados para o cálculo da potência desses aproveitamentos.

Como as séries de vazões variam no tempo e dependem de fatores climáticos e ambientais é recomendado utilizar no cálculo uma série representativa, de no mínimo 30 anos. Dessa forma pode-se ter uma métrica do comportamento hidrológico do rio e assim estimar com maior precisão a potência e energia gerada pelo futuro empreendimento. A grande dificuldade encontrada nesses estudos é que normalmente as séries de vazões que são encontradas nas estações localizadas nos rios em estudo e que são obtidas por meio de medições diárias, na maioria dos casos, encontram-se com um grande número de vazões desconhecidas ou duvidosas e com poucos anos de medição, necessitando então serem complementadas e extendidas com séries de vazões de rios vizinhos, ou na sua falta, com séries de precipitações.

Como mencionado anteriormente, as série de vazões médias são empregadas nos estudos de motorização que definem a potência do aproveitamento e também no cálculo da energia assegurada (a máxima produção de energia que ocorre em 95% dos anos hidrológicos simulados), que é utilizada em contratos de venda de energia. Nesse sentido segundo TESSARO (2010) é muito importante a qualidade e precisão dos estudos hidrológicos que estimarão essa série, pois uma série estimada abaixo do real, vai ocasionar uma sub

motorização do aproveitamento, gerando menos energia do que se pode, ocasionando um desperdício do potencial hidráulico disponível e, por outro lado, uma série estimada acima do real vai causar prejuízos ao empreendedor que vai investir mais do que o necessário na motorização e no final não vai conseguir entregar a energia contratada, tendo que se socorrer ao mercado para suprir a diferença entre a energia vendida e a energia entregue. Por isso se torna importante uma estimação precisa da série de vazões médias.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma técnica alternativa para fazer a estimação dos valores ausentes ou ruidosos de séries históricas de vazões dos rios brasileiros. A ideia é utilizar para isso redes neurais artificiais. Os resultados alcançados serão comparados com os obtidos por meio do uso de técnicas convencionais. Trabalhos relacionados foram pesquisados como o de SIQUEIRA (2009), KONO (2008) e SACCHI et al (2009) que fazem previsões de vazões e do nível de rio utilizando rede neurais para planejamento de sistemas hidrelétricos e prevenção de cheias.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos de maneira que o tema seja coerentemente abordado. Nesse capítulo introdutório, está contextualizado o problema discorrendo sobre aspectos da projeção econômica para os próximos anos, assim como planos de expansão de empreendimentos de energia elétrica no Brasil, dando ênfase a geração hidráulica. No Capítulo 2, será dado destaque ao processo de proposição de um novo empreendimento de geração de energia elétrica, quais são os estudos necessários e a finalidade de cada um. Ainda neste capítulo será comentado sobre a utilização da série histórica para estimação do potencial de geração, além de aspectos do porque as séries de vazão são corrompidas. No Capítulo 3 será apresentado como se faz a estimação das vazões nos aproveitamentos identificados, por meio de técnicas convencionais, também serão apresentados alguns casos mais comuns e como eles são resolvidos tradicionalmente. No Capítulo 4 será feita uma introdução sobre redes neurais artificiais, discorrendo sobre os tipos de redes, já no Capítulo 5 será feita uma apresentação dos dados adotados, assim como o detalhamento da metodologia a ser utilizada. O Capítulo 6 trará as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS REFERENTES A PROPOSIÇÃO DE NOVOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1. PROCESSO DE PROPOSIÇÃO DE UM NOVO EMPREENDIMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para implantação de uma Usina Hidroelétrica é necessário uma série de estudos, conforme mostrado na Figura 2.1, entre eles se destacam os Estudos Preliminares, o Inventário Hidroelétrico, o Estudo de Viabilidade, o Projeto Básico e o Projeto Executivo.

Figura 2.1 – Estudos necessários para implantação de uma Usina Hidroelétrica

Fonte: Manual de Inventário- Eletrobras (2007)

Os Estudos Preliminares são estudos estimativos, feitos em escritório e são baseado nos dados disponíveis, levantados por pesquisa, e servem para estimar o potencial e

custo dos aproveitamentos de um rio ou de uma bacia hidrográfica. Nesta etapa de proposição do novo empreendimento, são também levantados os estudos anteriores e os aproveitamentos existentes na referida bacia. Os Estudos Preliminares fazem uma caracterização geral da bacia com seus principais rios e afluentes desde de a nascente até sua foz. (NASCIMENTO, 2008)

Já o Estudo de Inventário é mais detalhado e busca estudar várias alternativas de partição de queda para o rio em estudo, escolhendo sempre a melhor alternativa, que é o arranjo de aproveitamentos que apresenta melhor equilíbrio em relação a fatores econômicos, energéticos e ambientais.

Em relação aos Estudos de Viabilidade, Projeto Básico e Projeto Executivo, eles são projetos cada vez mais detalhados e vão sendo concebidos conforme o andamento do processo de aprovação/implementação de uma usina hidroelétrica. (SOUZA, 2009)

2.2. ESTUDOS DE INVENTÁRIO

O Estudo de Inventário normalmente é feito com dados secundários, que são complementados com informações de campo e envolvem uma série de outros estudos em diversas áreas, sendo que os principais são os estudos de Cartografia/Topografia, Geológicos/Geotécnicos, Ambientais, Hidrológicos, Econômicos e Energéticos, entre outros, que serão detalhados a seguir. Conforme mencionado anteriormente o objetivo do Estudo de Inventário é gerar um conjunto de aproveitamentos hidroelétricos, divididos em pelo menos duas alternativas de partição de queda, que devem ser comparadas segundo critérios das relações custo-benefício e dos impactos socioambientais negativos. Assim, objetiva-se escolher a alternativa ótima, eliminando as demais, ou seja, busca a alternativa que gere mais energia ao menor custo, com menos danos ambientais e de acordo com a múltipla utilização de recursos hídricos. Para subsidiar a escolha da melhor alternativa é necessário se conhecer várias informações as quais são obtidas por meio dos estudos citados anteriormente, entre elas, a potência e a energia gerada pelos aproveitamentos da alternativa, assim com o custo dessa energia, além do custo de implementação de cada arranjo. (BRASIL, 2007)

Figura 2.2 – Exemplo de partição de queda

Fonte: Aneel (2010)

Na Figura 2.2 é apresentado um exemplo de alternativa de partição de queda, compostos com seis aproveitamentos, todos eles PCHs.

2.2.1. ESTUDOS CARTOGRÁFICOS / TOPOGRÁFICOS

Os estudos cartográficos utilizam normalmente dados obtidos a partir do mosaico de cartas que são disponibilizados pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército – DSG, e também por meio de Restituição Aerofotogramétrica que é uma ferramenta importante que permite o incremento da base cartográfica atual. A restituição é feita por meio de fotos aéreas tiradas sobre a área a ser estudada, as Figuras 2.3 e 2.4 mostram um exemplo de cartas cartográficas e fotos aéreas tiradas sobre um rio em estudo. Normalmente a simulação sob a carta cartográfica é complementada por pontos de apoio obtidos em campo.

Figura 2.3 – Cartas 1:100.000 na região do rio Jequitinhonha

Fonte: Inventário do rio Jequitinhonha e Araçuaí, MG - Aneel (2009)

Figura 2.4 – Fotos aéreas na região do rio Jequitinhonha

Fonte: Inventário do rio Jequitinhonha e Araçuaí, MG - Aneel (2009)

Segundo PINTO (2007) de uma forma geral os estudos topográficos são desenvolvidos inicialmente pelo levantamento do perfil longitudinal do rio, cujo objetivo é obter informações sobre a declividade, capazes de fornecer indicações precisas sobre as possíveis alternativas de partição de quedas. Nessa fase os Engenheiros e Técnicos percorrem as margens ao longo do rio e seus afluentes, utilizando para isso aparelhos de GPS.

Após a finalização do perfil do rio e de posse dos dados pós-processados com o nível de qualidade e precisão aceitável, é dado início ao passo seguinte, ou seja, a Restituição Aerofotogramétrica. As Restituições são realizadas a partir de fotos de voos nas escalas

1:60.000, de cartas cartográfica, de pontos Geodésicos coletados ao longo do rio e seus afluentes (perfil do rio) e de imagens de satélite.

O principal produto originado deste trabalho é a representação do relevo em curvas de nível equidistantes em 5m, que permite a parametrização das diversas alternativas de partição de queda, bem como a identificação da alternativa selecionada, conforme mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Curvas de nível na região do rio Jequitinhonha

Fonte: Inventário do rio Jequitinhonha e Araçuaí, MG - Aneel (2009)

Após a análise da restituição, já na última etapa, é realizado o levantamento de seções transversais topobatimétricas e instalação dos marcos geodésicos nos locais previstos para a implantação das estruturas hidráulicas da alternativa escolhida.

2.2.2. ESTUDOS GEOLÓGICOS

Nos estudos geológicos primeiramente são feitas pesquisas em cartas geológicas existentes na Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM, para se obter informações sobre a estratigrafia e litologia da região da bacia em questão. Também são levantados dados no Cadastro Mineiro pela ferramenta SIGMINE, disponíveis no site do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, podendo dessa forma ser possível inventariar os processos minerários protocolizados na região a ser estudada. São também

feitas pesquisas referentes à permeabilidade do solo, utilizando para isso mapas hidrogeológicos e pedológicos da região em estudo, conforme mostrado a Figura 2.6. Dessa maneira pode-se verificar se duas bacias diferentes tem similaridade geológica.

Estas pesquisas são aprofundadas com estudos da geologia local, onde se torna necessário fazer sondagens nos locais onde serão instaladas as barragens, casa de força e canal de adução, nos aproveitamentos selecionados.

Também são feitos levantamentos dos materiais de construção disponíveis, tais como areia, brita e argila que poderão ser utilizados nas futuras obras da Usina Hidroelétrica.

Figura 2.6 – Mapa hidrogeológico no estado do Mato Grosso

Fonte: Estudos de Inventário rio Sararé , MT – Aneel (2011)

2.2.3. ESTUDOS HIDROLÓGICOS

Os Estudos Hidrológicos, constituem elementos de grande importância na avaliação do comportamento Hidrológico e Sedimentológico do curso de água no qual será avaliada a implantação dos aproveitamentos hidrelétricos.

Inicialmente é feito um levantamento dos aspectos físicos da bacia e suas principais características, que são as seguintes: Área de Drenagem (A), Perímetro da Bacia (P), Comprimento aproximado do curso de água principal (L), Declividade do Rio (S), Índice de compacidade (Kc), Fator de forma (Ff), Índice de Conformação ou (Kf), Densidade de Drenagem (Dd), Tempo de concentração (Tc). (TUCCI, 1997)

Através da análise preliminar dessas características da bacia estudada, já se pode ter uma ideia de seu comportamento, mas esses estudos devem ser aprofundados com estudos de vazão média, estudos de vazão máxima e estudos sedimentológicos, que serão detalhados a seguir.

2.2.3.1. Estudos de vazão média

Primeiramente para esses estudos é necessário levantar a disponibilidade de postos fluviométricos e pluviométricos na região em estudo, caso não se encontrem dados suficientes na bacia em estudo deve-se então levantar dados nas bacias vizinhas de preferência com mesmo comportamento hidrogeológico, e depois transportá-los para a bacia em estudo, utilizando para isso técnicas de correlação. Para o caso de haver dados fluviométricos em quantidade suficiente na região, deve-se escolher inicialmente um Posto Base e a seguir a série de vazões desse Posto Base deve ter suas falhas preenchidas e série estendida através de correlação com outros postos, GOMES (2007). Dessa maneira se determina a série de vazão do Posto Base. Essa série deve posteriormente ser levada aos locais dos aproveitamentos identificados pelo estudo, por proporcionalidade de área de drenagem.

Já para o caso de não haver dados fluviométricos em quantidade suficiente, devemos utilizar as séries de precipitações dos postos encontrados na bacia em estudo, que devem ter suas falhas preenchidas e séries estendidas através do método do vetor regional. Obtendo dessa maneira a série de precipitados médios mensais da Bacia, que é utilizada para calibração do modelo chuva-vazão para o posto fluviométrico utilizado como base, obtém-se dessa maneira a série sintética de vazões para o rio em questão e seus aproveitamentos. Essa

metodologia é chamada de modelo chuva-vazão (SMAP), porque faz a conversão de chuva em vazão, conforme mostrada na Figura 2.7. (LUCAS, et.al.,2009)

Figura 2.7 – Metodologia utilizada para conversão de chuva em vazão

Fonte: Estudos de Inventário rio Sararé , MT – Aneel (2011)

2.2.3.2. Estudos de Cheia

Os estudos de cheia são utilizados para dimensionamento dos vertedouros e das obras de desvio do rio nos aproveitamentos identificados no inventário. Usualmente é utilizada a metodologia de regionalização de vazões máximas, recomendada pelos manuais da Eletrobrás (BRASIL,2007). A Figura 2.8 exemplifica uma curva de regionalização de vazões médias de cheia, que mostra a relação entre às vazões específicas médias de cheias com as áreas de drenagem das bacias.

Figura 2.8 – Curva de regionalização de vazões médias de cheia em relação a área de drenagem

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

De acordo com TUCCI (1997) para se determinar as distribuições probabilísticas das vazões máximas nos aproveitamentos identificados, é utilizada a distribuição probabilística Gumbel ajustada para as vazões máximas nos postos fluviométricos selecionados normalizadas pelas vazões médias de cheia, que são obtidas na curva de regionalização. Para determinar as vazões máximas instantâneas do rio nos aproveitamentos para fins de dimensionamento das obras de desvio do rio e do vertedouro é utilizado a fórmula de Füller, com coeficientes multiplicativos.

2.2.3.3 Estudos Sedimentológicos

Os estudos sedimentológicos do Inventário Hidrelétrico do rio são utilizados para avaliação da produção de sedimentos e da vida útil dos reservatórios dos aproveitamentos identificados.

2.2.4. ESTUDOS ENERGÉTICOS

Os estudos energéticos tem como objetivo avaliar a possibilidade de geração de cada aproveitamento inventariado, visando o pré-dimensionamento das características dos reservatórios, conjuntos turbinas – geradores e também subsidiar comparações de competitividade entre as alternativas de partição de queda. Iniciam-se com a determinação da energia média de cada aproveitamento constante das alternativas pré-selecionadas das divisões de queda estudadas, assim como da potência instalada desses aproveitamentos, para isso é fundamental conhecer a série de vazões médias mensais, com a maior precisão possível, pois diferenças na serie para mais ou para menos repercutirão em eventuais mudanças na motorização do aproveitamento além de diferenças na energia gerada e na energia assegurada que é a energia autorizada pelo órgão regulamentador para ser comercializada. (SOUZA et.al., 2009)

Para determinação da energia média é necessário conhecermos alguns parâmetros tais como a taxa de indisponibilidade programada, taxa de indisponibilidade forçada, os rendimentos das turbinas e dos geradores, e para aproveitamentos com derivação deve-se também conhecer as vazões remanescentes e a perda de carga na adução. De posse desses dados inicia-se as simulações, seguindo a metodologia da ANEEL com o objetivo exclusivo de determinar a energia assegurada, Esta metodologia considera uma queda líquida média constante utilizada para determinar a produtibilidade da usina, parâmetro este constante durante a simulação da operação. A simulação é então desenvolvida determinando a energia mensal através do produto da produtibilidade da usina pela vazão afluenta do mês, limitada pela potência instalada. Finalmente, a energia assegurada do aproveitamento corresponde a geração média nos meses do período critico. Para cada mês do histórico de vazões são determinados os despachos ótimos, ou seja, o número de máquinas e as vazões turbinadas que deveriam ser alocadas em cada unidade para maximizar a produção de energia. (PINTO, 2007)

As simulações das séries históricas de cada aproveitamento partem da análise do custo benefício incremental de motorização dos aproveitamentos e proporciona a obtenção dos valores econômicos mais interessantes para a definição das potências a serem instaladas. Nesta análise o incremento da motorização é considerado atrativo até o ponto em que os benefícios incrementais advindos do incremento de receita de geração se igualam aos custos

incrementais necessários para a implantação do arranjo. Na 2.9 é mostrado um exemplo de simulação de motorização de uma PCH.

Figura 2.9 – Simulação de motorização da PCH Formoso III, no rio Formoso

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

2.2.5. ESTUDOS ECONÔMICOS

A partir dos custos de implantação obtidos no orçamento padrão Eletrobrás, conforme exemplo mostrado na Figura 2.10, e em conjuntos com os resultados apresentados nos estudos energéticos para a alternativa de divisão de quedas selecionada, são calculados os ICB's finais dos aproveitamentos, que servem para definir a viabilidade econômica do aproveitamento.

Figura 2.10 – orçamento da PCH Formoso III, no rio Formoso

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

A formula para calculo do ICB é:

$$ICBi = \frac{CT \times FRC + COM \times Pi}{8760 \times Em} \quad (2.1) \quad FRC = \frac{j \times (1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \quad (2.2)$$

Onde,

CT é o custo total do aproveitamento incluindo juros durante a construção;

FRC é o fator de recuperação do capital;

j é a taxa de juros anual (10% a.a.)

n é a vida útil da usina (admitido 30 anos);

COM é o custo anual de operação e manutenção (admitido R\$ 10,00/kW.ano)

Pi é a Potência instalada (kW);

Em é a energia firme ou assegurada do aproveitamento.

2.2.6. ESTUDOS AMBIENTAIS

Estes estudos são feitos através de dados secundários e devem fornecer informações que subsidiem a formulação de divisão de queda e a concepção de aproveitamentos, avaliando impactos socioambientais positivos e negativos. A elaboração do diagnostico deve ser estruturada pelo enfoque dos seguintes componentes sínteses: ecossistemas aquáticos, ecossistemas terrestres, modos de vida, organização territorial, base econômica e população indígena. Esses estudos vão servir de subsídios para uma futura Avaliação Ambiental Integrada e devem destacar a historia e tendências evolutivas da região, de modo a permitir a construção de um cenário de desenvolvimento futuro. Estes estudos também devem conter potencialidades econômicas e turísticas da região, áreas mais preservadas e áreas mais degradadas, áreas de sensibilidade a presença de empreendimentos hidroelétricos, além de todo tipo de conflitos existentes, interferências sobre o patrimônio arqueológico, histórico e cultural, interferência sobre terras indígenas e unidades de conservação. (BRASIL, 2007)

Estes estudos também devem ter representação espacial, sendo divididos em sub-áreas, sendo que deve ser atribuídos pesos entre zero e um a cada subárea de forma a representar a importância dos processos que caracterizam a dinâmica dos componentes sínteses na área de estudo como um todo. O diagnostico final deve consolidar as análises de todos os componentes sínteses, adotando uma dinâmica interdisciplinar de forma

compreender as interações entre os processos relativos aos componentes, sendo o resultado final apresentado numa única tabela, conforme exemplo mostrado na tabela 2.1, dessa forma é possível de se ter um índice ambiental para cada alternativa estudada, que junto com o índice econômico ICB, servirão de subsídio para definição da alternativa ótima. (BRASIL, 2007)

Tabela 2.1 – Resumo dos componentes sínteses obtidos no estudo ambiental do rio Sararé

SUB ÁREA	Aquático	Terrestre	Modos de Vidas	Organização Territorial	Base Econômica	Índice Ambiental
	IAC _{Aq}	IAC _{Te}	IAC _{MV}	IAC _{OT}	IAC _{BE}	
PCS	0.503	0.260	0.134	0.068	0.035	
Alternativa 1	0.636	0.470	0.977	0.459	0.810	0.633
	0.320	0.122	0.131	0.031	0.028	
Alternativa 2	0.698	0.475	0.986	0.488	0.812	0.668
	0.351	0.124	0.132	0.033	0.028	
Alternativa 3	0.660	0.471	0.977	0.492	0.830	0.648
	0.332	0.123	0.131	0.033	0.029	
Alternativa 4	0.679	0.476	0.998	0.494	0.831	0.662
	0.342	0.124	0.134	0.033	0.029	
Alternativa 5	0.754	0.461	0.981	0.472	0.762	0.690
	0.379	0.120	0.132	0.032	0.027	

Fonte: Estudos de Inventário rio Sararé , MT – Aneel (2011)

2.2.7. SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS SELECIONADAS

As alternativas são comparadas através de uma representação gráfica, conforme ilustra exemplo mostrado na Figura 2.11, onde as abscissas representam o índice custo-benefício energético e as ordenadas o índice socioambiental negativo. As alternativas escolhidas são aquelas representadas por pontos próximos à região inferior esquerda do gráfico, o que corresponde à minimização simultânea dos dois índices.

Figura 2.11 – Comparação ICB x índice ambiental negativo do rio Sararé

Fonte: Estudos de Inventário rio Sararé, MT – Aneel (2011)

Considerando-se os índices custo-benefício calculados em conjunto com os índices ambientais, é efetuada a análise dos índices de preferências conforme diretrizes do Manual do Inventário da Eletrobrás. (BRASIL, 2007)

$$I = \rho_{cb} \times \frac{ICB}{CUR} + \rho_a \times IA \quad (2.3)$$

Onde:

ρ_{cb} - Peso que reflete a importância relativa do objetivo “minimização do índice custo-benefício energético”.

ρ_{an} - Peso que reflete a importância relativa do objetivo “minimização do índice de impacto socioambiental” .

Dessa forma obtém-se o índice total de cada alternativa, que serve como indicativo para escolha da alternativa ótima, que é aquela que vai gerar mais energia economicamente e com menos danos ambientais.

2.3. USO DA SÉRIE HISTÓRICA PARA GERAÇÃO DE POTENCIAL DE GERAÇÃO

As séries históricas de vazão média são fundamentais para os estudos de motorização, que definem a potência do aproveitamento em estudo, fornecendo subsídios para definir a melhor alternativa de partição de queda nos estudos de inventário através de critérios econômicos e ambientais, conforme mostrado anteriormente. São também importantes para o cálculo da energia média gerada e da energia assegurada que é usada nos contratos de venda de energia, a Figura 2.12 mostra um exemplo de série de gerações médias de um aproveitamento. Portanto imprecisões na estimação dessas séries representam diretamente diferenças na energia entregue pelo empreendedores, e podem ocasionar prejuízos futuros. Essas séries são encontradas em postos fluviométricos/pluviométricos existentes, que são encarregados de fazer as medições diárias de vazões. Nos rios brasileiros, principalmente os da região norte, onde hoje está concentrado a maior parte do potencial hidráulico remanescente, existe uma carência de dados, com poucas estações e nas estações existentes, séries com poucos anos e incompletas, e também com erros de medições/digitação.

Figura 2.12 – série de vazões medias mensais e produção media mensal de energia, na PCH III do rio Formoso.

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

2.4. ASPECTOS DO PORQUE AS SÉRIES DE VAZÕES SÃO CORROMPIDAS

Considerando que o Brasil tem dimensões continentais e que as estações estão localizadas nos rios, normalmente em regiões afastadas, como por exemplo na região Norte do País, certamente que existem dificuldades administrativas, de comunicação e de falta de

recursos, que são agravadas pela distância e que acarretam vários problemas como a carência de pessoas qualificadas para fazer as medições diárias, erros de leitura e digitação, além de enchentes que podem deslocar a régua, toda essa gama de problemas acaba gerando séries ruidosas.

2.5. CONCLUSÕES

Pelas previsões expostas anteriormente o Brasil deve ter nas próximas décadas um período de crescimento da economia, o que deve acentuar uma tendência já em curso de transformação de seus setores agrícolas, industriais e de serviços, que devem continuar se modernizando e automatizando seus processos produtivos na busca de melhores eficiências e qualidade, assim como também devem continuar as tendências de maior uso de eletrodomésticos e computadores nas residências. Tudo isso deve ter como consequência aumento no consumo de energia elétrica, o que exigirá na outra ponta um esforço no planejamento e investimento da expansão da oferta de energia elétrica pelos setores responsáveis, de forma a evitar futuros desabastecimentos. Também foi exposto nos capítulos anteriores, a representatividade da energia hidráulica no País e suas vantagens, além do plano de desenvolvimento energético brasileiro para as próximas décadas. É portanto de grande importância para o funcionamento adequado do sistema elétrico brasileiro conhecer de maneira mais realista possível a capacidade efetiva de produção sustentada das usinas hidrelétricas. Para isso existem metodologias de cálculo da garantia física (energia assegurada) das usinas que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN), assim como para o cálculo de garantia física de novos empreendimentos e revisão da garantia física dos empreendimentos existentes. Para o cálculo da garantia física é utilizada a série de vazão média mensal com histórico de no mínimo 30 anos e de preferência que englobe o período crítico (Jun de 1949 a Nov de 1956). Desse modo a energia assegurada de uma usina hidrelétrica, passou a ser um parâmetro de grande impacto comercial, pois é a energia autorizada a ser negociada, além de determinar o nível de participação no Mecanismo de Realocação de Energia – MRE, que tem a finalidade de compartilhar o risco hidrológico entre todas as usinas. (KELMAN, 2011)

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA CONVENCIONAL PARA ESTIMAÇÃO DE VAZÕES

3.1. INTRODUÇÃO

O primeiro passo para iniciar a estimação de vazão nos aproveitamentos a serem estudados com o objetivo de se calcular o potencial hidroenergético desse aproveitamento, é verificar a existência de postos fluviométricos e pluviométricos na região desses aproveitamentos.

Os postos fluviométricos são identificados pelo código e o nome da estação, e contém uma série de informações importantes como o nome do curso d'água, a unidade da Federação, a sub-bacia, sua latitude e longitude, a área de drenagem, o período de observações e o órgão responsável pela sua operação. A ANA - Agência Nacional de Águas disponibiliza esses dados em seu site na internet.

Nos postos fluviométricos são feitas medições de cotas (altura do nível de água), sendo que existe uma relação ligando a altura do nível da água com a vazão, essa relação cota-descarga é chamada de curva chave, e cada posto tem a sua. Para conseguirmos a curva chave de um determinado posto é necessário obtermos alguns pares cota-descarga medidos em condições reais, sendo que as cotas são medidas através de colocação de réguas verticais nas margens dos rios, e para a medição de vazão existem vários métodos, sendo o mais utilizado o que calcula a vazão a partir do valor da velocidade, que é medida em vários pontos de uma secção do rio com um equipamento chamado molinete. Com o conhecimento desses

pares medidos é possível então obtermos a curva chave, que permite obter a descarga que corresponde a uma determinada altura. (TUCCI, 1997)

Quando existe uma quantidade suficiente de postos fluviométricos, com dados hidrológicos de boa qualidade para os estudos, não há necessidade do levantamento de postos pluviométricos. Na tabela 3.1 é mostrado um exemplo de postos existentes na região de um rio em estudo, enquanto que na Figura 3.1 é mostrado um mapa da região desse rio com a localização dos postos fluviométricos.

Tabela 3.1- Exemplo de Postos Fluviométricos na região do ribeirão Santa Cruz, MG

Código ANA	Nome da Estação	F	R	D	S	Q	T	Código	Curso d'Água	UF	SB	Entidade	Latitude	Longitude	Área de Drenagem (km ²)	Início	Fim	Período de Observações (anos)
43250000	BURITIS	F	R	D				43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-15,6000	-46,4333	3.187	mai/1973	jun/1977	6
43250001	BURITIS	F	R	D				43200000	Urucuia	MG	43	CODEVASF	-15,6000	-46,4333	3.100	abr/1972	ago/1976	4
43250002	BURITIS-JUSANTE	F	R	D				43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-15,6158	-46,4150	3.187	out/1976		32
43300000	FAZENDA CARVALHO	F		D				43220000	São Domingos	MG	43	ANA	-15,5225	-46,2864	3.135	mai/1973		36
43360000	PIRATINGA	F		D				43231000	Piratinga	MG	43	ANA	-15,0314	-46,2922	434	nov/1999		9
43429998	ARINOS-MONTANTE	F	R	D	S	Q	T	43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-15,9244	-46,1097	11.856	jul/1976		33
43429999	ARINOS-MONTANTE	F	R	D				43200000	Urucuia	MG	43	CODEVASF	-15,9167	-46,0500	11.710	abr/1956	jul/1976	20
43430000	ARINOS	F	R	D	S	Q		43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-15,9167	-46,0500	11.710	jan/1956	jul/1977	22
43430002	ARINOS	F	R	D				43200000	Urucuia	MG	43	CEMIG	-15,9167	-46,0500	12.100	dez/1962	jun/1967	5
43670000	VILA URUCUIA	F	R	D			T	43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-16,3003	-45,7422	18.305	abr/1967		42
43670001	VILA URUCUIA	F		D				43200000	Urucuia	MG	43	CODEVASF	-16,1167	-45,7833	18.600	abr/1956	ago/1976	20
43670080	UHE INV ESCARAMUCA	F		D				43200000	Urucuia	MG	43	CEMIG	-16,1500	-45,8333	18.600			
43675000	FAZENDA CONCEICAO	F		D				43280000	Rib. Conceição	MG	43	ANA	-16,4281	-45,7422	2.200	mai/1984		25
43880000	SANTO INACIO	F		D				43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-16,2817	-45,4142	23.765	set/1962		46
43920000	PORTO NOVO	F		D				43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-16,2833	-45,4500	24.304	nov/1935	dez/1952	17
43920001	PORTO NOVO	F		D				43200000	Urucuia	MG	43	CODEVASF	-16,2667	-45,3000	23.470	mai/1956	nov/1958	3
43980000	BARRA DO ESCURO	F	R	D		Q		43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-16,2667	-45,2000	24.658	set/1955	dez/1986	31
43980001	BARRA DO ESCURO	F	R	D	S			43200000	Urucuia	MG	43	CODEVASF	-16,2667	-45,1667		nov/1968	ago/1976	8
43980002	BARRA DO ESCURO (PCD)	F	R	D	S	Q	T	43200000	Urucuia	MG	43	ANA	-16,2686	-45,2378	24.700	ago/1986		23

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Figura 3.1 –Mapa da bacia do ribeirão Santa Cruz, MG

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

As áreas de drenagens das estações fluviométricas são obtidas no “Inventário - Estações Fluviométricas” publicado pela ANEEL em 2001, enquanto as áreas de drenagens dos aproveitamentos são calculadas por planimétrica computacional das bacias hidrográficas, utiliza-se para isso as bases cartográficas do IBGE e do Exército. As áreas de drenagens são utilizadas juntamente com a vazão média da estação base para se estimar a vazão nos aproveitamentos, através de transposição por proporcionalidade de área de drenagem.

3.2. ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA

Após pesquisar os postos disponíveis na região do estudo, selecionamos os mais adequados, utilizando como critério a proximidade aos aproveitamentos e a quantidade/qualidade dos dados hidrológicos existentes, escolhendo desta forma o mais adequado para ser o posto base. A metodologia utilizada em estudos hidrológicos consiste primeiramente numa análise de consistência das cotas médias diárias. Para esta verificação, são elaborados os limnigramas das cotas médias nos locais dos postos fluviométricos selecionados. A análise dos limnigramas permite identificar inconsistências, que são corrigidas. (RAFFAELLI, 2010)

A análise de consistência dos postos fluviométricos selecionados pode constatar erros de digitação ou deslocamentos de régua nas cotas médias diárias dos limnigramas do rio em estudo, que devem ser corrigidos, esses casos são mostrados nas Figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.2 – Limnigrama das cota medias diárias do rio Urucaia nos postos fluviometricos Santo Inacio (43880000) e Vila Urucuia (4367000)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Figura 3.3 –Limnigrama das cotas medias diárias do ribeirão Conceição no posto fluviometrico Fazenda Conceição (43675000)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

No passo seguinte, deve-se verificar a consistência das relações cota x descarga, para isso se elaboram os gráficos, observando se existem pares que estejam saindo fora da curva, caso se ache necessário, pode-se achar uma nova equação que melhore a aderência dos pares as medições de descarga líquida. Para os casos que ocorrerem discrepâncias nas mencionadas análises as relações devem ser revisadas. Caso as relações sejam julgadas bem ajustadas, não há necessidade de revisão.

Continuando o autor, as relações cota x descarga do rio em estudo devem ser revisadas com o objetivo de melhorar a aderência dos pares às medições de descarga, conforme mostra o exemplo das Figuras 3.4 e 3.5. As Figuras anteriormente mencionadas foram apresentadas aos pares, sendo que a primeira apresenta a relação coletada na entidade e a segunda a relação revisada. Desta forma é possível verificar as inconsistências das relações cota x descarga fornecidas que motivaram as suas revisões.

Figura 3.4 – Relações cota x descarga do rio Urucuia no posto fluviométrico Vila Urucuia (43670000) (01/04/1967 a 31/03/2009)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Figura 3.5 – Relações cota x descarga coletadas e revisadas do rio Urucuia no posto fluviométrico Vila Urucuia (43670000) (01/04/1967 a 31/03/2009)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Após a verificação das cotas limnimétricas e das relações cota x descarga, as inconsistências devem ser corrigidas e assim podemos determinar as vazões médias mensais consistidas dos rios em estudo nos locais dos postos fluviométricos , que são as médias aritméticas diárias das vazões médias diárias de cada mês. Lembramos que a ANA – Agência Nacional de Águas disponibiliza séries consistidas, mas em muito casos é importante refazer essa análise para se obter uma série mais atualizada.

Após as análises de consistência, obtemos as séries de vazões médias consistidas do rio em estudo para os Postos selecionados, a tabela 3.2 mostra um exemplo de serie de vazões médias consistidas.

Tabela 3.2- Serie de Vazões médias mensais consistidas no posto Fazenda Conceição

Ano	Vazões Médias Mensais (m³/s) - Fazenda Conceição (43675000) - Ribeirão Conceição												Média Anual (m³/s)
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	
1984						10,8	9,4	10,5	11,8	16,0	21,1	55,6	
1985	180,5	41,0	38,8	17,1	10,9	8,8	7,6	6,5	7,0	20,7	27,9	72,9	36,6
1986	90,5	49,8	13,8	8,3	6,9	6,0	8,0	7,0	4,8	8,1	16,7	35,0	21,2
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,6	6,4	5,1	8,2	9,3	20,6	143,8	25,9
1988	27,8	43,8	51,4	35,6	11,4	9,1	7,7	6,5	5,0	13,8	14,1	56,4	23,5
1989	43,0	50,7	22,6	14,8	7,1	7,5	5,9	5,0	7,0	10,9	32,1	229,0	36,3
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,8	7,4	12,7	8,1	7,6	7,3	19,5	16,4	18,5
1991	54,1	38,6	188,5	38,3	16,4	12,7	10,2	8,5	8,9	11,1	53,2	38,7	39,9
1992	191,0	202,7	36,6	29,7	18,2	12,7	9,8	8,6	9,0	27,1	130,2	118,3	66,2
1993	49,9	82,8	26,8	23,8	14,3	11,3	9,1	8,2	7,3	14,4	12,2	61,8	26,8
1994	102,7	24,2	106,8	28,7	17,4	15,8	11,7	8,5	6,3	9,1	52,3	41,7	35,4
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	7,9	6,5	5,0	4,4	8,7	24,5	58,4	20,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,6	5,0	4,2	3,6	3,6	7,0	45,4	23,1	13,4
1997	63,3	23,2	95,1	33,2	14,8	13,4	7,4	5,6	5,4	7,1	16,7	40,2	27,1
1998	27,0	59,6	19,6	9,9	7,7	5,4	4,4	3,6	2,7	13,2	90,8	46,4	24,2
1999	33,8	13,8	58,3	9,9	5,5	4,6	4,0	3,5	3,5	4,3	30,7	43,5	18,0
2000	41,9	45,8	46,7	9,0	6,0	5,2	4,7	4,3	10,5	5,5	26,2	41,0	20,6
2001	17,5	6,9	16,3	5,6	6,2	5,0	4,0	3,7	3,7	7,6	16,1	25,5	9,8
2002	38,3	39,3	23,2	7,5	5,5	5,0	4,5	3,8	4,8	3,5	27,7	49,5	17,7
2003	87,0	17,8	31,3	11,7	7,3	5,4	4,9	4,5	4,0	4,3	13,3	21,9	17,8
2004	49,5	63,4						5,4	4,2	5,1	7,4	53,2	
2005	55,4	57,6	77,1	16,1	11,1	8,6	6,5	5,2	4,5	3,7	51,9	83,7	31,8
2006	28,1	15,8	65,7	40,7	12,7	9,0	7,5	6,1	13,8	18,6	46,2	120,7	32,1
2007	61,4	189,2	23,8	17,2	11,1	9,2	8,2	6,6	4,8	4,3	28,7	13,8	31,5
2008	52,7	24,1	50,0	19,7	7,3	5,5	4,6	3,4	2,7	1,9	15,3	43,8	19,2
2009	70,9	29,4	13,3										
Médias	59,3	49,9	46,0	19,3	10,4	8,3	7,1	5,9	6,2	9,7	33,6	61,4	26,7
Minimas	17,5	6,9	13,3	5,6	5,5	4,6	4,0	3,4	2,7	1,9	7,4	13,8	9,8
Máximas	191,0	202,7	188,5	40,7	18,2	15,8	12,7	10,5	13,8	27,1	130,2	229,0	66,2
Desvio-padrão	44,2	47,8	39,5	10,6	4,0	3,1	2,5	2,0	2,9	6,1	27,3	47,6	11,7
Coef. de variação (%)	75	96	86	55	38	38	35	34	46	63	81	78	44

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Analizando as séries de vazões médias mensais consistidas obtidas caso elas tenham falhas, estas devem ser preenchidas, também há a necessidade de estendê-la, pois a ANEEL exige no mínimo séries de 30 anos, mas normalmente para se ter uma melhor ideia do comportamento hidrológico de um rio os estudos consideram séries maiores e que englobem também o período crítico.

3.3. PREENCHIMENTO DAS SÉRIES DE VAZÕES MEDIAS MENSAIS

O próximo passo consiste em preencher as falhas e complementar as séries de vazões medias mensais nos postos fluviométricos selecionados, para isso, deve-se estabelecer relações de correlação entre duas estações, utilizando as estações que tenham melhor coeficiente de correlação. Dessa forma conseguimos determinar as séries de vazões medias mensais nos postos fluviométricos selecionados.

Quando a qualidade das correlações é boa, ou seja, a equação de correlação e o coeficiente de determinação R^2 resulta em valores próximos de 1, o preenchimento das séries de vazões médias mensais através da correlação deverá fornecer valores adequados para os meses que apresentaram falhas e para a extensão das séries, na Figura 3.6 e 3.7 mostramos exemplos de correlação entre dois postos.

Figura 3.6 – Correlação das vazões médias mensais do rio Urucuia nos postos fluviométricos Santo Inacio (43880000) e Vila Urucuia (43670000)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Figura 3.7 – Correlação das vazões médias mensais do ribeirão Conceição no posto fluviométrico Fazenda Conceição (43675000) e as vazões incrementais entre os postos fluviométricos Santo Inácio (4388000) e Vila Urucuia (43670000)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Este processo resulta na determinação das séries de vazões médias mensais do rio em estudo nos locais dos postos fluviométricos selecionados, a tabela 3.3 mostra um exemplo de serie de vazões medias mensais preenchida e estendida.

Cabe destacar que os valores preenchidos das vazões médias mensais estão destacados na cor azul.

Tabela 3.3- Serie de Vazões médias preenchidas no posto Fazenda Conceição

Ano	Vazões Médias Mensais (m³/s) - Fazenda Conceição (43675000) - Ribeirão Conceição												Média Anual (m³/s)
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	
1955										13,8	25,4	78,1	
1956	60,6	24,0	59,1	16,9	15,7	8,1	5,9	4,6	3,4	4,1	38,2	66,8	25,6
1957	98,2	73,0	100,1	69,2	25,1	15,1	11,3	8,2	7,3	7,3	20,6	49,6	40,4
1958	31,6	49,7	27,8	28,7	13,6	10,0	9,0	6,2	6,4	8,3	7,3	15,1	17,8
1959	50,8	20,0	42,2	14,9	8,0	6,3	4,7	3,7	3,0	6,8	25,9	19,5	17,1
1960	44,7	36,0	71,6	38,3	29,2	24,1	15,0	5,1	3,8	4,1	16,2	45,1	27,8
1961	82,2	42,7	21,9	6,2	10,0	6,1	4,9	3,8	2,9	3,1	5,6	15,6	17,1
1962	51,4	38,7	37,3	12,1	9,7	5,2	4,0	3,0	3,2	13,5	18,7	80,5	23,1
1963	66,4	59,3	38,4	15,6	7,8	4,8	5,0	4,0	3,1	2,0	9,8	13,7	19,2
1964	76,6	83,8	32,7	38,0	15,9	9,4	8,4	6,3	4,9	19,4	34,6	43,4	31,1
1965	22,3	12,5	45,5	44,9	17,2	11,5	9,8	8,9	9,0	16,5	27,8	25,3	20,9
1966	55,7	94,1	52,6	27,9	17,8	11,4	8,3	4,8	3,0	8,3	10,6	30,9	27,1
1967	19,9	28,8	35,7	29,6	12,0	8,4	6,1	4,3	4,3	2,0	33,0	56,6	20,0
1968	51,1	61,3	79,9	25,9	14,8	9,0	4,2	1,2	8,4	2,0	25,8	56,3	28,3
1969	33,2	45,7	34,5	20,8	18,0	9,3	6,6	3,4	1,4	6,5	40,2	60,5	23,3
1970	82,7	72,7	3,1	3,5	12,5	2,2	7,4	5,2	4,4	32,0	73,6	33,5	27,7
1971	16,5	10,4	18,1	13,1	4,7	2,8	0,9	2,4	2,5	14,7	84,3	96,0	22,2
1972	16,6	36,0	38,6	29,0	13,6	7,9	6,7	2,3	0,6	17,8	54,0	55,3	23,2
1973	43,1	29,1	58,6	55,9	16,0	9,3	8,6	3,7	1,6	34,3	67,0	63,8	32,6
1974	46,4	29,8	71,9	70,0	32,7	18,3	14,1	11,5	7,0	19,0	24,7	40,9	32,2
1975	37,5	31,8	11,5	44,6	12,6	7,6	6,7	4,4	3,9	10,0	22,5	23,6	18,1
1976	10,5	19,3	28,0	11,4	7,2	4,3	2,9	1,7	3,8	21,8	51,0	45,5	17,3
1977	41,6	31,9	12,4	18,1	11,1	7,7	4,4	2,0	1,5	10,0	24,6	23,7	15,7
1978	51,5	59,5	88,1	36,8	24,5	27,7	21,1	15,2	12,4	21,1	30,8	70,1	38,2
1979	154,4	139,7	110,3	79,0	39,2	29,1	23,6	20,5	18,6	17,1	60,1	39,9	61,0
1980	140,4	108,6	41,9	33,9	17,5	17,8	14,3	10,4	9,9	10,7	34,9	64,2	42,0
1981	75,2	23,7	56,2	50,3	17,3	17,9	10,6	9,9	5,3	22,2	83,6	42,5	34,6
1982	126,0	72,0	65,9	39,0	20,9	18,9	15,6	11,5	10,5	9,5	11,0	11,7	34,4
1983	62,4	111,2	66,4	52,9	22,0	19,4	14,2	9,8	10,2	13,5	38,6	110,0	44,2
1984	24,7	22,0	22,4	59,7	18,0	10,8	9,4	10,5	11,8	16,0	21,1	55,6	23,5
1985	180,5	41,0	38,8	17,1	10,9	8,8	7,6	6,5	7,0	20,7	27,9	72,9	36,6
1986	90,5	49,8	13,8	8,3	6,9	6,0	8,0	7,0	4,8	8,1	16,7	35,0	21,2
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,6	6,4	5,1	8,2	9,3	20,6	143,8	25,9
1988	27,8	43,8	51,4	35,6	11,4	9,1	7,7	6,5	5,0	13,8	14,1	56,4	23,5
1989	43,0	50,7	22,6	14,8	7,1	7,5	5,9	5,0	7,0	10,9	32,1	229,0	36,3
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,8	7,4	12,7	8,1	7,6	7,3	19,5	16,4	18,5
1991	54,1	38,6	188,5	38,3	16,4	12,7	10,2	8,5	8,9	11,1	53,2	38,7	39,9
1992	191,0	202,7	36,6	29,7	18,2	12,7	9,8	8,6	9,0	27,1	130,2	118,3	66,2
1993	49,9	82,8	26,8	23,8	14,3	11,3	9,1	8,2	7,3	14,4	12,2	61,8	26,8
1994	102,7	24,2	106,8	28,7	17,4	15,8	11,7	8,5	6,3	9,1	52,3	41,7	35,4
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	7,9	6,5	5,0	4,4	8,7	24,5	58,4	20,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,6	5,0	4,2	3,6	3,6	7,0	45,4	23,1	13,4
1997	63,3	23,2	95,1	33,2	14,8	13,4	7,4	5,6	5,4	7,1	16,7	40,2	27,1
1998	27,0	59,6	19,6	9,9	7,7	5,4	4,4	3,6	2,7	13,2	90,8	46,4	24,2
1999	33,8	13,8	58,3	9,9	5,5	4,6	4,0	3,5	3,5	4,3	30,7	43,5	18,0
2000	41,9	45,8	46,7	9,0	6,0	5,2	4,7	4,3	10,5	5,5	26,2	41,0	20,6
2001	17,5	6,9	16,3	5,6	6,2	5,0	4,0	3,7	3,7	7,6	16,1	25,5	9,8
2002	38,3	39,3	23,2	7,5	5,5	5,0	4,5	3,8	4,8	3,5	27,7	49,5	17,7
2003	87,0	17,8	31,3	11,7	7,3	5,4	4,9	4,5	4,0	4,3	13,3	21,9	17,8
2004	49,5	63,4	35,5	32,1	12,9	9,1	7,7	5,4	4,2	5,1	7,4	53,2	23,8
2005	55,4	57,6	77,1	16,1	11,1	8,6	6,5	5,2	4,5	3,7	51,9	83,7	31,8
2006	28,1	15,8	65,7	40,7	12,7	9,0	7,5	6,1	13,8	18,6	46,2	120,7	32,1
2007	61,4	189,2	23,8	17,2	11,1	9,2	8,2	6,6	4,8	4,3	28,7	13,8	31,5
2008	52,7	24,1	50,0	19,7	7,3	5,5	4,6	3,4	2,7	1,9	15,3	43,8	19,2
2009	70,9	29,4	13,3										
Médias	58,4	50,3	46,5	27,6	13,9	10,1	8,1	6,1	5,9	11,4	34,1	53,9	27,2
Mínimas	10,5	6,9	3,1	3,5	4,7	2,2	0,9	1,2	0,6	1,9	5,6	11,7	9,8
Máximas	191,0	202,7	188,5	79,0	39,2	29,1	23,6	20,5	18,6	34,3	130,2	229,0	66,2
Desvio-padrão	39,7	39,9	32,5	17,9	7,0	5,9	4,3	3,5	3,5	7,5	24,4	37,5	10,8
Coef. de variação (%)	68	79	70	65	51	58	53	57	60	66	71	70	39

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

3.4. ANÁLISE DO REGIME FLUVIAL

A partir da determinação das séries de vazões médias mensais dos rios nos postos fluviométricos selecionados, pode-se desenvolver uma análise do regime fluvial e da disponibilidade hídrica com base em parâmetros hidrológicos e estatísticos. Esta análise servirá para se conhecer o comportamento hidrológico do rio, assim como as vazões garantidas e as vazões específicas. Podemos então construir hidrogramas, já com as vazões médias mensais preenchidas e também construir as curvas de permanência que servem para comparar o comportamento hidrológico de dois rios frente a resposta do solo as precipitações. Com esses dados podemos também verificar a distribuição sazonal das vazões médias mensais e anuais dos rios, identificando o período seco e o período úmido. As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam exemplos de hidrogramas e de curvas de permanência das vazões médias mensais, cabe destacar que as vazões médias mensais preenchidas são destacadas com linhas pontilhadas.

Figura 3.8 – Hidrograma das vazões médias mensais do ribeirão Conceição no posto fluviométrico Fazenda Conceição (43675000)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Figura 3.9 – Permanência das vazões médias mensais do ribeirão Conceição no posto fluviométrico Fazenda Conceição (43675000)

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

3.5. TRANSPOSIÇÃO DAS SÉRIE DE VAZÕES MÉDIAS MENSAIS PARA OS APROVEITAMENTOS IDENTIFICADOS

As séries de vazões médias mensais nos locais dos aproveitamentos identificados no rio em estudo, são determinadas por proporcionalidade de área de drenagem utilizando a série de vazões médias mensais da estação base. (OTSUKI, et.al.,2011)

Sendo assim se utiliza a seguinte relação genérica para a determinação das séries de vazões médias mensais nos aproveitamentos identificados:

$$Q_{PCH} = Q_{Posto} * (\text{Área PCH} / \text{Área Posto})$$

Onde:

Q_{PCH} = vazão média mensal no aproveitamento(PCH), em m³/s;

Área PCH = área de drenagem no local do aproveitamento, em km²;

Área Posto= área de drenagem no local do posto base .

Q_{Posto} =Vazão média mensal no posto base

A Figura 3.10 ilustra um exemplo onde é mostrada a localização dos Eixos identificados dos Aproveitamentos, aonde serão determinadas as séries de vazões medias mensais para cada um por proporcionalidade de área de drenagem em relação ao posto base.

Figura 3.10 – Localização dos eixos dos aproveitamentos identificados no ribeirão Santa Cruz

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

A análise da série de vazões médias mensais nos locais dos aproveitamentos identificados permitem determinar os parâmetros estatísticos e hidrológicos característicos, que podem ser comparados com os parâmetros do posto base. Esta análise estatística incluiu, dentre outros, os seguintes parâmetros:

- vazão específica;
- vazão média de longo termo;
- vazão máxima média mensal;
- vazão mínima média mensal;
- desvio-padrão;

- coeficiente de variação;
- vazões para permanências entre 1 e 100 %.

A título ilustrativo a tabela 3.4, apresenta um exemplo de análise estatística e hidrológica detalhada da série de vazões médias mensais do rio em estudo, nos locais dos aproveitamentos identificados e do posto fluviométrico escolhido como base, já Figura 3.11 apresenta as curvas de permanência dos aproveitamentos identificados.

Tabela 3.4- Características hidrológicas dos aproveitamentos identificados no ribeirão Santa Cruz

Parâmetros	Aproveitamentos Ribeirão Santa Cruz e Posto Fluviométrico Selecionado								
	PCH Eucalipto	PCH Embaúba	PCH Araça	PCH Imbuía	PCH Almas	PCH Jatobá	PCH Ipê	PCH Cedrinho Baixo (Alto)	Fazenda Conceição
Rio	Rib. Santa Cruz	Rib. Santa Cruz	Rib. Santa Cruz	Rib. Santa Cruz	Rib. Santa Cruz	Rib. Santa Cruz	Rib. Santa Cruz	Rib. Santa Cruz	Rib. Conceição
Extensão da Série (anos)	53	53	53	53	53	53	53	53	53
Período de Observação	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008	Jan/1956 a Dez/2008
Área de Drenagem (km ²)	239,9	333,8	427,4	577,6	1.087,1	1.198,8	1.254,9	1.419,7	2.293,0
Precipitação (mm/ano)	1.090	1.090	1.090	1.090	1.090	1.090	1.090	1.090	1.090
Vazão específica (l/s/km ²)	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Coef. de Escoamento	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Média (m ³ /s)	2,8	4,0	5,1	6,9	12,9	14,2	14,9	16,9	27,2
Máxima (m ³ /s)	24,0	33,3	42,7	57,7	108,6	119,7	125,3	141,8	229,0
Mínima (m ³ /s)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6
Desvio-padrão (m ³ /s)	3,2	4,5	5,7	7,7	14,6	16,1	16,8	19,0	30,7
Coef. de variação (%)	113	113	113	113	113	113	113	113	113
Permanência (%)	Vazões Médias Mensais Garantidas (m ³ /s)								
1	15,8	21,9	28,1	38,0	71,4	78,8	82,5	93,3	150,7
2	12,5	17,3	22,2	30,0	56,4	62,2	65,1	73,7	119,0
3	10,7	14,9	19,1	25,8	48,6	53,6	56,1	63,5	102,6
5	8,7	12,2	15,6	21,1	39,6	43,7	45,8	51,8	83,6
10	6,4	9,0	11,5	15,5	29,2	32,2	33,7	38,1	61,6
15	5,4	7,5	9,7	13,1	24,6	27,1	28,4	32,1	51,8
20	4,6	6,4	8,2	11,0	20,7	22,9	23,9	27,1	43,8
25	4,0	5,6	7,1	9,6	18,2	20,0	21,0	23,7	38,3
30	3,3	4,6	5,9	7,9	14,9	16,5	17,2	19,5	31,5
35	2,7	3,7	4,8	6,5	12,2	13,5	14,1	15,9	25,7
40	2,3	3,2	4,1	5,5	10,4	11,5	12,1	13,6	22,0
45	1,9	2,6	3,4	4,5	8,6	9,4	9,9	11,2	18,0
50	1,7	2,3	3,0	4,0	7,5	8,3	8,7	9,8	15,9
55	1,4	2,0	2,5	3,4	6,4	7,1	7,4	8,4	13,5
60	1,2	1,7	2,1	2,9	5,4	5,9	6,2	7,0	11,4
65	1,0	1,4	1,8	2,5	4,7	5,2	5,4	6,1	9,9
70	0,9	1,2	1,6	2,1	4,0	4,4	4,6	5,2	8,5
75	0,8	1,1	1,4	1,9	3,5	3,9	4,1	4,6	7,4
80	0,7	0,9	1,2	1,6	3,0	3,3	3,5	3,9	6,4
85	0,5	0,7	1,0	1,3	2,4	2,7	2,8	3,2	5,1
90	0,5	0,6	0,8	1,1	2,0	2,3	2,4	2,7	4,3
95	0,4	0,5	0,7	0,9	1,7	1,8	1,9	2,2	3,5
98	0,2	0,3	0,4	0,6	1,1	1,2	1,3	1,4	2,3
100	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

Figura 3.11 – Permanência das vazões medias mensais nos aproveitamentos identificados no ribeirão Santa Cruz

Fonte: Estudos de Inventário ribeirão Santa Cruz , MG – Aneel (2010)

3.6. EXEMPLOS DE SÉRIES DE VAZÕES CORROMPIDAS

Nesta seção vamos mostrar alguns casos de séries de vazões corrompidas, encontradas em estudos de inventario, e quais foram às soluções encontradas para resolver os problemas tradicionalmente.

3.6.1. Inventário do rio Negro

O rio Negro está localizado no estado do Mato Grosso do Sul, a Figura 3.12 mostra a localização do rio negro, seus afluentes e rios vizinhos, assim como as principais estações fluviometricas localizadas na região de sua bacia.

Figura 3.12 – Bacia do rio Negro

Fonte: Estudos de Inventário do rio Negro , MS – Aneel (2006)

Fazendo uma análise dos dados das estações da região do rio Negro, observamos que as estações Fazenda rio Negro e Perto da Bocaina, teriam por um lado preferência para serem escolhidas como estação base por estarem localizadas no rio Negro, mas por outro lado como são estações desativadas e possuem séries pequenas de 15 e 8 anos, como pode ser visto nas tabelas 3.5 e 3.6 respectivamente.

Tabela 3.5 – Série de vazões medias mensais da estação fluviométrica Perto Bocaina

AD=	1.740	km²	ESTAÇÃO PERTO DA BOCAINA (66886000)										m³/s
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	média
1979							20,28	16,23	17,72	34,18	44,17	39,79	28,7
1980	43,79	50,08			18,75	15,09		10,94	19,18	14,85	34,05	33,98	26,7
1981	53,71	41,88	30,99	22,16	26,28	27,95	17,24	16,16	15,19	33,82	22,37	38,72	28,9
1982	51,69	51,70	55,93	35,57	26,84	23,73	21,99	18,11	18,20	21,06	24,98	37,83	32,3
1983	58,04	51,88	40,16	33,96	36,60	32,15	26,59	20,42	18,81	23,95	36,20	35,41	34,5
1984													
1985													
1986	49,22	38,28	34,54	28,20	23,14								34,7
1987													
1988													
1989													
1990													
1991													
1992													
1993													
1994						22,80	14,80	10,90	8,91	9,80	13,90		13,5
MED	51,3	46,8	40,4	30,0	26,3	24,3	20,2	15,5	16,3	22,9	29,3	37,1	29,3
MAX	58,0	51,9	55,9	35,6	36,6	32,2	26,6	20,4	19,2	34,2	44,2	39,8	58,0
MIN	43,8	38,3	31,0	22,2	18,7	15,1	14,8	10,9	8,9	9,8	13,9	34,0	8,9

Fonte: Estudos de Inventário do rio Negro , MS – Aneel (2006)

Tabela 3.6 – serie de vazões medias mensais da estação fluviométrica Fazenda rio Negro

AD= 14.770 km²		ESTAÇÃO FAZENDA RIO NEGRO (66890000)											m³/s
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	média
1968												3,90	3,9
1969	32,37	22,15	15,41	13,01	20,62	10,75	4,65	2,78	2,02	2,47	3,38	5,47	11,3
1970	13,96	31,91	44,65	18,38	37,21	17,83	7,99	3,01	1,56	1,16	1,06	1,55	15,0
1971	10,41	7,64	15,03	20,35	16,26	8,31	10,34	7,07	4,25	9,15	6,86	80,56	16,4
1972	38,48	51,75	148,56	88,65	39,01	33,41	14,51	7,83	6,71	7,45	85,55	141,07	55,2
1973	107,99	61,99	80,49	41,73	40,18	24,88	16,11	6,64	3,21	10,97	71,01	162,46	52,3
1974	210,32	191,74			107,92	108,46		24,15	9,62	6,95	17,39	85,27	83,4
1975	179,35	151,83					32,38	17,29	10,97	15,51	39,97	105,70	69,1
1976	171,94	177,67	177,67	123,53	91,99	136,51	67,97	35,89	46,58	70,90	61,90	141,51	108,7
1977						66,99	46,32	22,50					45,3
1978	265,60	182,76	172,68	103,36	55,92	53,28	31,78	16,48	12,66	34,23	58,27	161,01	95,7
1979	164,19	195,81	193,12	104,69	72,51								146,1
1980		179,37	239,33	186,38	139,44	82,50	37,90	24,90	21,59			58,44	107,8
1981	214,69			102,86	110,52	88,88	48,53	26,01	19,55	71,66	34,86	37,87	75,5
1982	138,59	168,78											153,7
1983													
1984													
1985												4,30	4,3
MED	129,0	118,6	120,8	80,3	66,5	57,4	32,6	16,2	12,6	23,0	38,0	76,1	64,3
MAX	265,6	195,8	239,3	186,4	139,4	136,5	72,6	35,9	46,6	71,7	85,5	162,5	265,6
MIN	10,4	7,6	15,0	13,0	16,3	8,3	4,6	2,8	1,6	1,2	1,1	1,6	1,1

Fonte: Estudos de Inventário do rio Negro , MS – Aneel (2006)

Como essas estações não possuem dados suficientes para o estudo, torna-se necessário buscar as estações dos rios vizinhos, entre eles o rio Coxim e rio Taquarizinho, com o objetivo de obter dados que cubram um período maior de tempo, o gráfico temporal mostrado na Figura 3.13, nos da uma visão dos dados existentes na região do rio Negro. Dessa maneira utilizando essas estações foi possível complementar e estender as séries de vazões do rio negro.

Figura 3.13 – Gráfico temporal de dados das estações fluviométricas da região do rio Negro

Fonte: Estudos de Inventário do rio Negro , MS – Aneel (2006)

3.6.2. Inventário do rio Sararé

O rio Sararé está localizado no estado do Mato Grosso, a Figura 3.14 mostra a localização do rio Sararé, seus afluentes e rios vizinhos, assim como as principais estações fluviométricas localizadas na região de sua bacia.

Figura 3.14 – Bacia do rio Sararé

Fonte: Estudos de Inventário rio Sararé , MT – Aneel (2011)

Fazendo uma análise dos dados das estações da região do rio Sararé, observamos que não existem estações fluviométricas nele, nesse caso, vamos utilizar as estações do rio Guaporé, escolhendo uma para base e utilizando as outras para através de correlação estender e complementar a serie da estação base, as tabela 3.11, 3.12 e 3.13 mostram as séries de vazões medias das estações fluviométricas encontradas no rio Guaporé.

Tabela 3.7 – Serie de vazões medias mensais da estação fluviométrica Pontes e Lacerda no rio Guaporé

Ano	Vazões Médias Mensais (m³/s) - Pontes e Lacerda (15050000) - Rio Guaporé												Média Anual (m³/s)
	Janetiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	
1971							29,5	28,6	27,7	29,8	33,0	33,0	
1972	34,0	47,5	48,5	66,3	41,0	40,8	33,1	31,1	30,6		32,9	52,2	
1973	43,3	56,5	54,4	52,0	42,8	37,5	35,1	30,8	29,8	31,1	36,7	44,5	41,2
1974	61,6	74,3	69,4	65,8	61,5	44,8	37,8	35,7	35,2	38,3	38,2	57,7	51,7
1975	71,1		99,7	72,8	66,1	42,0	39,5	34,5	34,5	33,6	40,1	50,7	
1976	56,8	66,3	81,3	73,7	56,3	50,1	42,7	39,6	40,4	41,3	47,3	53,0	54,1
1977	70,3	61,8	72,6	60,5	55,4	48,2	38,7	40,3	43,0	43,8	48,3	59,7	53,5
1978	73,7	75,7	68,0	67,7	57,0	48,2	39,6	35,7	34,4	35,8	37,5	81,0	54,5
1979	108,9	85,2	109,0	97,6	72,3	51,2	45,9	42,5	43,8	45,2	41,7	51,2	66,3
1980	65,4	76,9	115,7	83,0	60,0	50,5	45,3	41,6	40,5	42,5	45,1	49,2	59,8
1981	65,4	94,4	105,3	60,5	51,8	44,3	40,3	35,7	35,4	36,3	41,3	46,2	54,7
1982	64,8		116,0	87,9	61,9	51,8	47,3	46,4	46,4	53,4	58,7	71,6	
1983	84,3	98,0	108,1	91,1	72,4	61,4	48,0	43,4	41,5	45,7	42,4	49,0	66,4
1984	59,8	50,4	83,5	90,9	68,9	44,1	37,3	34,6	35,8	36,4	48,3	55,1	53,8
1985	79,9	88,6	99,1	90,8	65,5	49,6	46,3	43,4	43,5	48,7	49,7	45,8	62,6
1986	68,9	79,4	113,5	102,2	96,1	64,4	50,4	47,6	48,0	45,1	46,4	63,2	68,9
1987	74,8	71,6	66,5	64,7									
1988	118,0	148,6	122,6	101,9	89,6	60,4	49,1	43,6	42,7	43,9	47,4	64,9	77,7
1989	77,0	90,3	98,7	110,5	80,5	54,7	51,3	48,1	44,2	43,2	43,5	51,2	66,1
1990	72,0	94,3	65,3	116,2	77,4	56,6	46,6	43,1	45,5	48,7	55,0	55,2	64,7
1991	78,4	83,0	98,1	105,9	65,4	52,5	44,1	38,7	39,7			42,5	
1992	48,1												
1993	62,0		88,6	68,0	55,0	43,4					48,4	49,2	
1994	55,2	80,6	61,7	79,1	56,1	45,8	42,4	35,4	33,9	39,5	53,7	59,2	53,5
1995	74,9	85,2	130,3	74,2	70,1	49,6	40,9	36,5	36,4	35,7	45,6	61,2	61,7
1996	64,4	66,6	126,6	94,8	63,9	45,8	39,8	37,4	37,5	36,6	63,0	46,6	60,2
1997	61,9	111,8	128,1	95,3	62,0	51,0	39,6	39,1	37,5	37,8	41,6	41,9	62,3
1998	46,8	68,8	104,7	82,6	56,2	49,3	43,5	45,1	42,5	46,5	58,5	72,3	59,7
1999	67,7	70,7	70,5	69,2	49,9	44,1	42,7	39,8	46,0	49,3	50,6	52,6	54,4
2000	58,5	68,3	105,0	78,2	56,0	44,0	42,0	40,8	39,0	39,2	53,4	57,5	56,8
2001	74,4	66,9	88,5	81,2	51,8	48,3	40,3	37,8	39,1	41,5	48,6	55,8	56,2
2002	67,8	77,2	76,6	85,5	65,4	51,1	40,1	42,3			44,8	50,5	
2003	44,4	74,4	116,4	89,9		42,4	37,7	35,2	39,5	44,9	50,3	57,6	
2004	116,0	78,9	54,6	59,9	49,1	40,3	36,8	34,5	35,9	34,5	47,2	44,1	52,6
2005	68,2	82,5	74,0	65,1	48,7	41,7	33,8	32,1	34,4	36,5	45,1	61,5	52,0
2006	105,4	115,6	71,6	96,9	77,0	46,4	38,1	32,6	31,5	47,1	40,9	69,1	64,3
2007	88,1	111,4	68,3	61,6	50,6		35,2	39,5	39,3	40,1	44,5	45,5	
2008	52,7	42,3	72,6	64,8		44,1	42,0	34,7	40,3	45,1	45,1	44,8	
2009	95,4	80,5	107,7	85,9	52,8	47,4	45,5	39,0	37,1	36,4	40,1	53,0	60,1
2010	58,4	78,7	83,0										
Médias	70,2	80,1	90,1	80,9	62,6	48,2	41,3	38,5	38,6	41,1	46,0	54,0	58,8
Mínimas	34,0	42,3	48,5	52,0	41,0	37,5	29,5	28,6	27,7	29,8	32,9	33,0	41,2
Máximas	118,0	148,6	130,3	116,2	96,1	64,4	51,3	48,1	48,0	53,4	63,0	81,0	77,7
Desvio-padrão	19,0	20,5	23,0	16,2	13,1	6,1	5,0	4,9	5,0	5,7	6,8	9,7	7,2
Coef. de variação (%)	27	26	26	20	21	13	12	13	13	14	15	18	12

Fonte: Estudos de Inventário rio Sararé , MT – Aneel (2011)

Tabela 3.8 – Serie de vazões medias mensais da estação fluvimetrica Vila Bela da Santíssima Trindade no rio Guaporé

Ano	Vazões Médias Mensais (m³/s) - Vila Bela da Sant. Trindade (15120001) - Rio Guaporé												Média Anual (m³/s)
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	
1976							50,0	36,2	32,3	35,4	42,3	63,9	
1977	155,1	236,8	267,5	187,5	111,9	81,7	58,9	38,9	33,9	39,3	49,5	75,4	111,4
1978	199,2	254,5	226,5	143,0	97,6	67,6	45,2	35,7	31,9	37,0	45,5	78,8	105,2
1979	248,3	275,7	379,4	333,8	194,6	102,2	60,9	45,3	40,6	40,9	43,7	53,0	151,5
1980	125,0				198,3	103,8	67,1	44,8	35,5	35,7	42,1	66,7	
1981	131,7	289,1	394,8	293,2	134,7	74,7	51,0	38,8	34,8	34,8	43,1	49,9	130,9
1982	109,2	196,4	292,0	317,6	211,2	109,6	69,9	54,2	50,0	57,2	65,8	80,8	134,5
1983	183,1	217,4	257,0	218,2	120,8	120,3	74,2	45,9	35,5	33,3	40,8	85,4	119,3
1984	244,6	259,8	328,0	312,4	273,4	115,3	61,8	40,9	36,9	36,0	63,2	206,0	164,9
1985	268,3	425,7	426,6	351,2	212,0	94,3	61,9	48,4	39,5	38,4	46,4	47,7	171,7
1986	136,3	276,6	260,8	303,2	206,5	137,4	79,1	59,2	54,6	47,6	41,8	53,5	138,0
1987	78,5	133,1	120,2	115,2	93,6	70,1	51,8	37,8	32,9	34,4	47,2	69,7	73,7
1988	177,7	432,3	651,0	381,5	227,9	110,3	71,8	52,5	41,4	37,0	37,7	57,9	189,9
1989	107,2	239,0	309,7	307,7	241,4	110,5	77,1	61,2	44,2	40,2	41,4	61,5	136,8
1990	175,7	423,9						76,9	56,2	52,6	54,4	69,8	75,0
1991	104,0	294,7	510,2	437,5	238,4	124,1	78,0					52,8	
1992	85,5	225,9	419,2	247,1	123,4	76,4	47,7	32,2					
1993				205,4	99,2	54,6	40,9	39,9					
1994	90,2	226,0	228,2	184,9	138,6	75,5	68,8	48,5	37,6			78,8	
1995	268,3	296,4	377,0	280,0	204,0	139,4	80,0	53,0	40,1	33,0	34,0	206,8	167,7
1996	251,9	271,7	409,7	489,8	258,3	107,0	67,1	52,6	45,8	41,2	82,5	135,7	184,4
1997	136,9	385,9	428,5	431,3	240,9	125,9	80,8	58,8	48,5	44,7	42,7	70,6	174,6
1998	67,4	112,5	231,5	196,1	105,1	70,0	49,9	40,9	36,8	35,6	57,8	138,2	95,2
1999	179,8	154,9	184,5	245,5	129,1	68,3	53,2	36,2	32,1	32,5	35,0	47,3	99,9
2000	64,2	136,8	330,4	260,9	99,7	67,1	51,8	45,8	33,1	29,3	41,6	61,6	101,9
2001	74,6	116,2	185,8	226,9	116,4	81,1	55,7	37,5	29,8	28,3	36,1	55,8	87,0
2002	98,8	117,1	302,4	177,0	111,3	73,7	49,1						
2003	53,7	80,9	112,3	190,2	81,7	54,1	38,6	28,8	27,7	28,9	31,7	44,7	64,4
2004	121,9	232,9	152,7	72,3	83,1	55,8	43,9	35,4	25,8	25,1	40,9	70,1	80,0
2005	209,1	248,8	269,8	213,2	109,8	73,8	49,2	35,2	28,1	32,7	33,8	58,8	113,5
2006	189,8	317,2	249,1	350,1	200,4	92,6	57,5	35,6	27,3	36,7	44,1	63,4	138,7
2007	136,6	346,9	273,3	191,4	130,1	67,4	44,5	35,2	26,8		33,0	48,5	
2008	73,3	316,0	387,0	319,4	125,6	74,1		31,1	25,4	22,8	26,8	31,7	
2009	72,5	144,3	430,0	412,9	182,7	86,9	58,9	44,9	34,0	27,8	32,2	53,1	131,7
2010	150,6	225,5											
Médias	144,5	247,2	313,2	270,9	159,4	89,6	59,8	43,4	36,5	36,4	44,6	75,6	127,8
Mínimas	53,7	80,9	112,3	72,3	81,7	54,1	38,6	28,8	25,4	22,8	26,8	31,7	64,4
Máximas	268,3	432,3	651,0	489,8	273,4	139,4	80,8	61,2	54,6	57,2	82,5	206,8	189,9
Desvio-padrão	64,1	94,1	118,6	99,2	58,9	24,5	12,7	8,9	8,0	7,8	12,5	41,5	35,8
Coef. de variação (%)	44	38	38	37	37	27	21	21	22	21	28	55	28

Fonte: Estudos de Inventário rio Sararé , MT – Aneel (2011)

Figura 3.15 – Bacia do rio Formoso

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

Tabela 3.10 – Estações fluviométricas da região do rio Formoso

Nº	ESTAÇÃO	CÓDIGO	FONTE	RIO	Q _{MLT} [m³/s]	DRENAGEM [km²]	PERÍODO	
							INÍCIO	FIM
A	Cachoeira	66040000	ANA	Sepotuba	115	4.050	07/1979	01/1986
A	Tapirapuã	66050000	ANA	Sepotuba	167	5.150	08/1971	12/2002
A	S. J. do Sepotuba	66055000	ANA	Sepotuba	227	8.640	10/1969	10/2004
A	Fazenda Salu	66071300	ANA	Jauru	72,3	2.426	02/1984	12/1994
A	UHE Jauru	66055000	ENGECON	Jauru	88,8	2.420	01/1931	12/1999
A	Água Suja	66071400	ANA	Jauru	96,5	2.998	07/1979	07/2004
A	Nortelândia	66006000	ANA	Santana	38,2	1.686	12/1967	09/2004
B	Porto Esperidião	66072000	ANA	Jauru	102	5.759	12/1965	01/2003
B	MT 125	66065000	ANA	Cabaçal	74,6	5.000	09/1969	10/2003
B	Barra do Bugres	66010000	ANA	Paraguai	168	10.120	01/1966	08/2004
B	Porto Estrela	66015000	ANA	Paraguai	192	12.319	06/1971	11/2003
B	Jauquara	66008000	ANA	Jauquara	22,8	1.285	12/1967	08/2005
CURVAS DE REGRESSÃO		Região A - Chapada dos Parecis			$Q = - 2 \times 10^6 (AD)^2 + 0,047 (AD) - 28,02$			
		Região B - Depressão Paraguai			$Q = 0,0416 (AD)^{0,8926}$			

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

Fazendo uma análise dos dados das estações da região do rio Formoso, observamos que não existem estações fluviométricas nele, nesse caso então temos de utilizar as estações do rio Sepotuba, escolhendo uma para base e utilizando as outras para através de correlação estender e complementar a serie da estação base, a tabelas 3.16, 3.17, e 3.18 mostram as séries de vazões medias das estações fluviométricas localizadas no rio Sepotuba.

Tabela 3.11 – serie de vazões medias mensais da estação fluviométricas Cachoeira localizada no rio Sepotuba

ESTACÃO - Cachoeira / Rio Sepotuba (Área de Drenagem = 4.050 km²)															
ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MTN.	MED.	MÁX.
1966	109,7	313,8	271,1	128,8	83,6	80,8	62,2	32,4	32,1	63,7	38,7	64,8	467	73,4	1512
1967	104,1	192,6	237,4	190,3	78,0	67,0	43,3	31,8	19,7	48,6	62,1	72,0	371	71,7	16,8
1968	100,4	344,1	273,4	111,3	79,0	48,6	39,2	37,1	43,9	87,7	43,8	173,4	489	76,9	1867
1969	336,1	186,8	222,8	138,7	33,9	82,7	43,6	36,1	38,2	611	81,3	110,3	464	73,8	1551
1970	106,8	271,1	383,4	110,0	116,2	68,9	49,0	48,3	44,3	612	48,8	67,4	437	62,5	1051
1971	88,4	109,9	16,2	91,4	71,2	42,4	30,9	23,0	20,3	40,3	64,3	89,8	467	62,1	83,8
1972	96,8	298,0	220,0	132,0	86,4	47,8	38,8	29,2	28,6	36,3	31,8	202,0	542	811	1460
1973	266,0	284,0	281,0	103,0	88,9	66,2	44,2	31,8	28,3	419	116,0	168,0	446	68,2	99,2
1974	488,0	481,0	609,0	378,0	267,0	123,0	78,9	83,6	66,8	74,4	86,2	147,0	501	89,6	1491
1975	311,0	343,0	414,0	382,0	110,0	102,0	78,2	67,8	47,9	82,7	104,0	187,0	510	82,8	18,9
1976	226,0	470,0	480,0	436,0	178,0	123,0	33,6	81,8	64,0	84,2	121,0	177,0	544	102,4	2007
1977	362,0	378,0	234,0	241,0	203,0	110,0	90,1	82,4	68,8	84,8	116,0	238,0	583	93,8	1430
1978	681,0	236,0	448,0	283,0	268,0	188,0	91,4	88,6	88,7	82,8	110,0	282,0	608	99,4	1436
1979	808,0	720,0	647,0	418,0	238,0	188,0	114,0	35,6	103,0	36,1	97,8	178,0	670	117,7	2098
1980	457,0	631,0	541,8	284,0	203,0	142,0	140	310	77,5	33,1	96,6	280,0	637	139,6	1780
1981	588,0	436,0	408,0	322,0	170,0	160	92,5	71,4	600	36,5	13,0	95,0	53,4	99,4	66,0
1982	336,0	963,0	696,0	428,0	99,0	180	107,0	90,1	114,0	110,0	172,0	280,0	703	124,1	2220
1983	437,0	368,0	446,0	267,0	80,0	167,0	98,9	79,7	68,8	54,8	110	486,0	669	127,1	1910
1984	357,0	290,0	320	366,0	287,0	123,0	98,6	77,0	33,8	94,4	110,0	249,0	70,5	11,4	162,2
1985	397,0	316,0	406,0	310	203,0	16,0	397	66,3	66,8	81,8	907	76,8	68,8	162	160
1986	89,0	316,0	288,0	192,0	127,0	110,0	81,6	69,1	70,0	71,9	88,3	18,9,0	730	105,7	167,9
1987	220,0	338,0	376,8	111,3	104,0	97,0	88,0	62,3	48,7	60,2	71,8	272,2	578	96,9	168,8
1988	428,0	431,0	812,0	476,0	283,0	162,0	103,0	77,3	88,6	88,7	84,8	238,0	669	185	227,4
1989	581,0	418,0	601,0	748,1	239,0	189,0	106,0	98,9	86,9	77,6	120,0	170,0	667	11,2	162,5
1990	271,0	336,0	267,0	284,0	188,0	106,0	71,1	69,8	33,4	128,0	142,0	183,0	632	96,8	1321
1991	837,2	338,4	1.190,6	881,9	403,8	164,0	113,0	79,6	90,6	84,8	118,8	293,8	643	16,7	234,7
1992	572,0	248,0	414,0	474,0	234,0	118,0	36,3	70,1	188,7	348,4	1028,8	880,0	708	102,4	2215
1993	467,0	417,0	397,0	289,0	187,0	243,0	126,1	77,0	70,1	88,2	107,2	121,8	699	162,2	177,0
1994	267,0	287,0	409,0	268,0	110	98,8	84,0	81,0	89,4	78,8	78,4	180,0	687	133,9	167,6
1995	616,9	727,1	382,0	326,0	282,0	143,0	102,0	32,2	84,6	89,9	129,0	281,0	663	110	228,0
1996	412,0	366,0	610,0	325,0	110	120,0	88,7	88,8	88,8	76,0	142,0	177,0	667	11,3	190,4
1997	378,0	488,0	329,0	396,0	222,0	168,0	87,0	76,7	72,8	80,2	111,0	227,0	742	114,3	1910
1998	170,0	218,0	384,0	284,7	122,0	88,4	82,4	78,6	86,6	87,0	2611	421,2	660	93,8	1430
1999	286,0	287,0	381,0	269,0	132,0	34,7	72,1	61,9	61,7	46,1	73,4	162,0	608	114	2007
2000	111,0	388,0	681,0	283,0	128,0	317	88,2	61,9	66,1	46,4	84,0	188,0	604	94,9	1710
2001	221,0	202,0	269,0	162,0	118,0	76,8	64,8	43,8	68,9	73,8	111,0	398,0	582	94,3	169,9
2002	603,0	418,0	460,0	269,0	168,0	110	77,3	83,2	68,6	67,3	82,9	127,0	632	96,9	1677
2003	313,0	432,0	477,0	468,0	188,0	127,0	86,7	88,8	71,6	83,1	128,0	183,0	668	108,8	177,9
2004	303,7	690,0	284,4	182,2	128,8	91,4	88,3	87,0	817	312	108,6	116,4	649	100,1	175,5
2005	113,8	109,8	114,1	78,7	87,8	67,6	48,8	44,8	87,8	74,6	80,9	112,9	446	22,2	18,6
Mín.	61,2	74,4	83,8	760	66,9	54,8	49,3	44,1	37,1	44,9	460	46,7	37,1	66,9	83,8
Méd.	127,4	117,8	147	121	116	82,8	71,4	63,7	63,2	66,2	79,9	96,7	63,2	96,9	164,7
Máx.	2098	228,0	246,8	80,6	117	110	87,6	80,9	103,4	142,7	2315	663	80,9	162,5	2468

Preenchimento, extensão da série efetuadas por correlação com Tapirapuã

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

Tabela 3.12 - serie de vazões medias mensais da estação fluviométricas Tabirapuã localizada no rio Sepotuba

ESTÇÃO- Tapirapuã / Rio Sepotuba (Área de Drenagem = 5.150 km²)															
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MIN.	MED.	MAX.
1988	133,6	214,8	201,0	144,0	117,9	101,8	95,1	78,2	75,9	98,3	82,7	87,2	75,9	119,7	214,6
1987	130,4	172,3	189,3	171,4	114,3	98,8	87,2	75,3	80,3	90,1	103,0	110,2	80,3	116,9	189,3
1986	125,3	223,7	201,7	129,0	114,9	91,9	83,3	81,1	87,8	107,1	92,0	184,3	81,1	125,4	223,7
1985	221,1	189,6	184,0	148,0	118,2	103,4	87,4	78,1	82,3	73,9	83,0	84,8	73,9	120,5	221,1
1979	99,7	170,3	171,7	127,0	116,1	88,3	81,8	71,8	71,1	78,0	73,2	78,0	71,1	101,9	171,7
1971	108,0	121,4	138,8	124,9	107,4	90,0	80,2	76,0	76,3	89,9	101,0	104,0	76,0	101,2	136,8
1972	134,0	239,0	181,0	183,0	129,0	102,0	96,2	88,6	83,3	91,3	106,0	150,0	88,3	132,4	239,0
1973	154,0	161,0	162,0	124,0	113,0	93,7	83,1	76,3	72,5	73,1	98,7	123,0	72,5	111,2	162,0
1974	216,0	218,0	244,0	221,0	159,0	125,0	104,0	89,9	81,8	86,4	88,0	123,0	81,8	146,3	244,0
1975	160,0	172,0	196,0	188,0	140,0	110,0	100,0	91,7	83,1	87,7	123,0	167,0	83,1	134,9	196,0
1976	222,0	329,0	250,0	217,0	172,0	139,0	116,0	98,5	96,1	88,6	118,0	162,0	88,6	167,4	329,0
1977	214,0	234,0	191,0	177,0	170,0	141,0	115,0	95,8	102,0	111,0	121,0	167,0	95,8	153,2	234,0
1978	235,0	205,0	202,0	203,0	185,0	162,0	121,0	105,0	102,0	114,0	125,0	189,0	102,0	162,3	235,0
1979	344,0	321,0	304,0	251,0	179,0	152,0	132,0	114,0	127,0	111,0	119,0	160,0	111,0	192,8	344,0
1980	226,0	301,0	320,0	244,0	191,0	147,0	126,0	115,0	114,0	109,0	116,0	148,0	109,0	179,8	320,0
1981	258,0	250,0	249,0	201,0	163,0	134,0	114,0	106,0	95,0	102,0	125,0	135,0	95,0	161,0	258,0
1982	208,0	291,0	386,0	248,0	175,0	157,0	129,0	123,0	142,0	159,0	180,0	259,0	123,0	204,8	386,0
1983	317,1	287,0	282,0	265,0	202,0	170,0	137,0	122,0	112,0	118,0	187,0	259,0	112,0	204,8	317,1
1984	253,0	213,0	248,0	259,0	190,0	147,0	125,0	119,0	115,0	117,0	146,0	235,0	115,0	180,6	259,0
1985	290,0	238,0	397,0	310,0	204,0	158,0	142,0	123,0	119,0	133,0	132,0	122,0	119,0	197,3	397,0
1986	215,0	275,0	259,0	224,0	193,0	146,0	124,0	123,0	119,0	132,0	123,0	158,0	119,0	174,3	275,0
1987	221,0	216,0	255,0	180,0	150,0	136,0	111,0	98,5	94,2	105,0	105,0	208,0	94,2	156,6	255,0
1988	248,6	247,3	373,0	298,0	212,0	169,0	141,0	120,0	109,0	112,0	121,0	197,0	109,0	195,5	373,0
1989	237,0	299,0	298,0	247,0	204,0	152,0	138,0	132,0	117,0	112,0	119,0	126,0	112,0	181,8	299,0
1990	201,0	226,0	212,0	185,6	181,8	130,8	116,0	103,0	115,0	140,0	129,0	144,0	103,0	156,4	226,0
1991	202,0	276,0	385,1	289,8	240,3	166,8	136,3	116,2	122,3	104,8	137,3	155,0	104,8	194,1	385,1
1992	240,2	244,2	261,8	287,8	196,8	144,7	126,8	116,4	183,8	226,1	382,3	281,8	115,4	216,6	383,3
1993	267,0	290,0	285,0	235,0	194,0	164,0	139,0	120,2	116,4	114,0	135,2	142,8	114,0	183,5	290,0
1994	219,0	258,0	258,0	237,0	172,0	150,0	133,0	122,0	112,0	118,0	112,0	147,0	112,0	169,8	258,0
1995	244,0	374,0	256,0	253,0	176,0	147,0	129,0	118,0	108,0	112,0	128,0	152,0	108,0	183,1	374,0
1996	210,0	225,0	312,0	227,0	174,0	145,0	129,0	118,0	112,0	116,0	198,0	217,0	112,0	181,9	312,0
1997	237,0	313,0	303,0	231,0	179,0	160,0	134,0	122,0	121,0	123,0	127,0	182,8	121,0	186,9	313,0
1998	177,4	189,6	178,0	234,0	164,4	127,0	111,0	110,0	106,0	106,0	138,0	209,0	106,0	153,2	234,0
1999	202,0	218,0	329,0	262,0	159,0	137,0	122,0	107,0	105,0	102,0	115,0	131,0	102,0	165,8	329,0
2000	148,0	199,0	230,0	218,6	149,0	127,0	114,0	103,0	98,4	99,4	129,0	197,0	98,4	155,0	230,0
2001	213,0	201,0	224,0	188,0	144,0	133,0	110,0	94,8	102,0	115,0	127,0	196,0	94,8	154,0	224,0
2002	212,6	274,8	264,3	196,0	155,0	127,0	113,0	105,0	105,0	103,0	113,0	122,0	103,0	156,7	274,8
2003	207,1	291,6	287,4	234,8	180,6	132,2	118,0	109,9	108,6	130,1	183,9	187,6	108,6	177,4	291,6
2004	241,6	287,4	206,1	210,6	173,3	128,3	133,6	112,8	105,3	110,8	131,8	126,3	105,3	163,6	287,4
2005	183,8	179,2	188,8	128,4	110,6	93,8	81,0	72,8	110,2	121,6	148,6	184,6	72,6	134,2	183,8
Mín.	99,7	121,4	136,8	124,0	107,4	89,3	80,2	71,8	60,4	73,1	73,2	76,0	60,4	92,8	136,8
Med.	210,1	242,2	256,2	215,5	164,6	134,1	116,2	104,6	103,8	110,9	129,8	162,4	103,8	161,8	256,2
Max.	344,0	374,0	405,0	312,4	248,4	170,0	142,0	132,0	168,9	233,6	379,8	272,4	132,0	265,2	405,0
XXXXXX Reenchimento , extensão da série por correlação com São José do Sepotuba															
XXXXXX Substituição de dados diuvidados por correlação com São José do Sepotuba															

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

Tabela 3.13 – série de vazões medias mensais da estação fluviométricas São Jose do Sepotuba localizada no rio Sepotuba

ESTACÃO - São José do Sepotuba / Rio Sepotuba (Área de Drenagem = 8.640 km²)															
ANO	JAN	FEB	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MIN.	MÉD.	MAX
1966	197,4	313,4	293,8	212,4	175,0	161,8	142,3	116,3	114,9	144,1	124,7	146,4	114,9	177,5	313,4
1967	192,8	262,7	277,2	261,4	189,8	147,8	131,0	114,0	92,8	136,2	163,8	183,8	92,8	173,5	277,2
1968	188,8	328,4	294,8	190,8	170,7	137,8	126,4	122,4	131,8	168,8	137,8	241,4	122,4	185,8	328,4
1969	322,8	248,8	288,8	218,6	176,4	164,2	131,3	118,4	124,0	112,0	125,0	142,0	112,0	178,6	322,8
1970	149,0	250,0	252,0	188,0	171,0	134,0	123,0	109,0	108,0	115,0	111,0	115,0	108,0	152,1	252,0
1971	158,0	180,0	202,0	185,0	160,0	135,0	121,0	110,0	108,0	126,0	139,0	150,0	108,0	147,8	202,0
1972	197,0	314,0	240,0	235,0	178,0	147,0	134,0	125,0	124,0	122,0	143,0	223,0	122,0	181,8	314,0
1973	224,0	228,0	224,0	176,0	171,0	137,0	125,0	116,0	113,0	118,0	188,0	203,0	113,0	168,4	228,0
1974	324,0	340,0	343,0	302,0	215,0	175,0	150,0	139,0	131,0	135,0	136,0	194,0	131,0	215,3	343,0
1975	264,0	254,0	286,0	267,0	198,0	158,0	148,0	132,0	128,0	134,0	191,0	239,0	128,0	199,9	286,0
1976	283,0	462,0	376,0	318,0	247,0	201,0	170,0	149,0	152,0	152,0	195,0	249,0	149,0	248,2	462,0
1977	318,0	344,0	298,0	261,0	245,0	212,0	170,0	150,0	160,0	161,0	189,0	254,0	150,0	230,0	344,0
1978	336,0	319,0	291,0	288,0	260,0	226,0	177,0	155,0	153,0	178,0	195,0	300,0	153,0	239,7	336,0
1979	488,0	447,0	427,0	361,0	258,0	215,0	192,0	169,0	193,0	175,0	189,0	249,0	169,0	280,3	488,0
1980	340,0	445,0	449,0	361,0	292,0	220,0	189,0	169,0	172,0	159,0	179,0	223,0	159,0	266,5	449,0
1981	403,0	358,0	367,0	279,0	229,0	197,0	166,0	151,0	143,0	161,0	194,0	215,0	143,0	238,6	403,0
1982	288,0	423,0	560,0	346,0	253,0	212,0	188,0	184,0	214,0	247,0	274,0	351,0	184,0	295,0	560,0
1983	460,0	449,0	405,0	383,0	288,0	247,0	196,0	170,0	167,6	176,0	273,3	391,0	167,6	300,5	460,0
1984	365,0	326,0	370,0	374,0	271,0	216,9	185,9	177,4	171,8	174,6	215,8	341,0	171,8	265,8	374,0
1985	429,0	349,0	568,0	430,0	293,0	227,0	203,0	183,1	177,4	197,2	198,8	161,7	177,4	286,2	568,0
1986	312,8	397,4	384,0	331,0	285,0	219,0	187,0	185,0	184,0	206,0	192,0	255,0	184,0	261,5	397,4
1987	352,0	330,0	384,0	261,0	215,0	201,0	164,0	148,0	142,0	151,0	163,0	307,0	142,0	234,8	384,0
1988	368,0	380,1	528,0	421,0	303,0	239,0	200,0	177,0	165,0	170,0	179,0	298,0	165,0	283,3	528,0
1989	364,0	431,2	429,8	357,9	297,3	224,0	204,2	195,8	174,6	167,6	177,4	187,3	167,6	267,6	431,2
1990	293,0	328,3	308,6	290,2	287,8	193,4	173,2	154,9	171,8	207,0	191,5	212,7	154,9	230,2	328,3
1991	294,5	398,8	667,2	436,2	360,1	229,0	188,8	171,2	181,3	168,3	202,7	228,2	156,3	283,7	667,2
1992	547,1	363,0	384,6	387,7	281,0	206,8	177,3	182,2	233,8	324,8	628,4	378,1	162,2	312,1	529,4
1993	381,3	414,3	407,1	338,4	276,7	233,7	197,9	189,2	182,2	180,1	181,4	202,8	180,1	261,0	414,3
1994	298,0	298,0	350,0	322,0	231,0	205,0	182,0	165,0	157,0	172,0	164,0	248,0	157,0	232,8	350,0
1995	346,0	533,0	351,0	345,0	240,0	197,0	170,0	157,0	146,0	163,0	191,0	222,0	146,0	255,1	533,0
1996	313,0	325,0	447,0	320,0	232,0	186,0	169,0	161,0	149,0	149,0	285,0	310,0	149,0	253,8	447,0
1997	377,0	447,2	377,0	380,0	275,0	216,0	177,0	163,0	159,0	170,0	177,0	277,0	159,0	268,3	447,2
1998	254,0	272,0	262,0	337,8	220,0	186,0	167,0	156,3	150,6	150,6	196,4	298,2	150,6	220,1	337,8
1999	293,0	321,0	482,0	344,0	225,0	191,0	175,0	160,0	157,0	146,0	176,0	208,0	146,0	239,8	482,0
2000	213,0	311,0	439,0	312,0	219,0	182,0	162,0	154,0	151,0	151,0	195,0	272,0	151,0	230,1	439,0
2001	291,0	301,0	384,0	251,0	207,0	180,0	162,0	144,0	144,0	157,0	189,0	321,0	144,0	225,1	384,0
2002	306,0	398,0	368,0	288,0	212,0	175,0	160,0	150,0	148,0	143,0	149,0	193,0	143,0	224,2	398,0
2003	298,0	423,0	417,0	339,0	229,0	187,0	163,0	154,0	152,0	184,0	234,0	269,0	152,0	254,1	423,0
2004	349,0	417,0	295,0	303,0	248,0	178,2	189,0	158,0	148,0	155,0	188,2	178,8	148,0	233,6	417,0
2005	278,4	268,8	287,8	181,5	164,8	128,8	111,2	98,8	164,6	171,3	211,2	284,6	98,8	190,0	278,4
Mín.	149,0	180,0	202,0	176,0	160,0	134,0	121,0	109,0	92,7	112,0	111,0	115,0	92,7	138,5	202,0
Méd.	307,0	351,5	369,8	308,4	236,4	192,1	168,0	152,5	153,0	163,6	193,7	242,7	152,5	235,4	369,8
Máx.	488,0	533,0	585,7	453,3	361,6	247,0	204,2	195,8	241,5	337,2	553,9	394,7	195,8	383,0	585,7

Preenchimento por correlação com Tapirapuã
 Preenchimento e extensão da série por correlação com Porto Estrela

Fonte: Estudos de Inventário do rio Formoso, MT - Aneel (2007)

3.6.4. Inventário do rio Cupari

O rio Cupari não possui dados fluviométricos observados em quantidade e qualidade suficiente, apesar de ter existido nele uma Estação Fluviométrica (Fazenda Goiano), que operou por 3 anos e foi desativada, além de possuir muitas falhas, devido a isso escolheu-se o posto fluviométrico Creporizão como base, este posto está localizado na bacia do rio Crepori, sendo que esta bacia possui semelhança hidrogeológica (regime de chuvas e geologia) com a bacia do rio Cupari. Para preenchimento de falhas da série do posto base Creporizão (17610000) foi utilizado, correlação estatística entre os postos da bacia. A Figura 3.16 mostra a bacia do rio Cupari e a tabela 3.14 mostra as estações fluviométricas na região do rio Cupari, já a tabela 3.15 mostra série de vazões médias mensais do posto base Creporizão.

Figura 3.16 – Bacia do rio Cupari

Fonte: Estudos de Inventário do rio Cupari, PA - Aneel (2010)

Tabela 3.14 – Estações fluviométricas da região do rio Cupari

Código	Nome	Rio	Área (km²)	Entidade	Início	Fim
17200000	Porto Roncador	Teles Pires	10.861*	ANA	set/73	abr/07
17210000	Teles Pires	Teles Pires	12.857*	ANA	mai/76	abr/07
17280000	Cachoeirão	Teles Pires	20.076*	ANA	dez/75	dez/07
17300000	Fazenda Tratex	Teles Pires	40.753*	ANA	jan/95	dez/07
17380000	Jusante Fazenda Peixoto	Teles Pires	82.014*	ANA	out/80	dez/06
17430000	Barra de São Manuel	Tapajós	332.649*	ANA	nov/75	mar/07
17500000	Fortaleza	Tapajós	363.018	ANA	abr/83	mar/07
17610000	CrepORIZÃO	Crepori	6.290	ANA	set/87	dez/08
17650002	Acará do Tapajós	Tapajós	389.579*	ANA	jan/96	dez/06
17675000	Jardim do Ouro	Jamamxim	37.456*	ANA	dez/87	fev/07

* Planimetria atualizada – Inventário do rio Tapajós – 2008

Fonte: Estudos de Inventário do rio Cupari, PA - Aneel (2010)

Tabela 3.15 – serie de vazões medias mensais do posto Creporizão

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1987									17	16	58	116
1988	262	359	470	521	321	145	56	11	2			
1989		829	621	478	379	170	86	50	21	132	77	255
1990	231											
1991												
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999								30	29	23	36	111
2000	223	434	629	570	331	104	50	28	18	68		
2001												
2002			397	485	315				10	29	58	75
2003	157	297	487	567	260	110	47	23	24			
2004					270	145	68	41	42	46	63	118
2005	162	322	505	364	324	118	56	27	20		188	194
2006	272	371	519	688	577	223	96	47	32	64	92	100
2007	140	382	455	329	241	115	57	26	30	36	48	100
2008	167	358	597	471	490	171	71	33	29	52	100	223
Média	202	419	520	497	351	145	65	31	23	52	80	143

Fonte: Estudos de Inventário do rio Cupari, PA - Aneel (2010)

3.7. CONCLUSÕES

Neste capítulo explicamos de forma detalhada a metodologia convencional para estimação de vazão. Mostramos alguns casos como o de rios que possuem estações fluviométricas desativadas e com poucas medições de vazões e também casos de rios que não possuem estações. Esses dois casos são muito comuns na prática. Nessas circunstâncias necessitamos buscar dados em estações próximas. Para isso é necessário o trabalho de um especialista para escolher as estações mais adequadas, ou seja, as que estão localizadas em regiões que possuem características hidrogeológicas similares as da região onde se localiza o rio a ser estudado.

CAPÍTULO 4

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

4.1. INTRODUÇÃO

A idéia de se construir uma máquina ou mecanismo autônomo constitui um sonho antigo dos pesquisadores da área de ciências e engenharia. Embora os primeiros trabalhos desta área tenham sido publicados a mais de 50 anos atrás, esse campo começou a ser fortemente pesquisado a partir dos anos 90, por isso é normal que se diga que ainda é uma área relativamente nova. As aplicações destes sistemas considerados inteligentes são as mais diversas possíveis, tais como:

- ❑ No sistema de controle de aeronaves.
- ❑ No reconhecimento de novos sistemas estelares.
- ❑ Nos variados processos envolvidos aos sistemas elétricos de potência.
- ❑ Na análise de imagens de satélite.
- ❑ No reconhecimento da escrita e da fala.

Além de outras aplicações como em elevadores, onde quase não se nota a partida e parada do mesmo; e em eletrodomésticos, como máquinas de lavar roupa e fritadeiras. A indústria cinematográfica também tem explorado o assunto através dos vários filmes de ficção sobre inteligência artificial e suas implicações.

De qualquer forma, isto tudo mostra o grande crescimento desta área, evidenciado cientificamente por meio dos inúmeros trabalhos apresentados nos congressos e nas revistas

especializadas. A área de sistemas inteligentes é constituída por uma combinação de técnicas de modelagem e computação, que podem ser também denominadas como técnicas de Soft Computing, cujo objetivo de destaque desse conjunto de técnicas está em alcançar tratabilidade, robustez, baixo custo e altas taxas de eficiência. Mais especificamente, a utilização de sistemas inteligentes, notadamente aqueles baseados em redes neurais artificiais, em sistemas e controladores *fuzzy*, e em algoritmos genéricos, já têm sido aplicados com sucesso na solução de diversos problemas envolvidos com a identificação de sistemas. As características mais atrativas destas técnicas consistem em sua elevada habilidade em mapear sistemas não-lineares e à sua facilidade de ser integrado com outras ferramentas numéricas e computacionais já existentes. Essa capítulo aborda os principais aspectos sobre as redes neurais artificiais.

4.2. HISTÓRICO RESUMIDO

A primeira publicação relacionada à neuro-computação é datada de 1943 através do artigo de McCulloch e Pitts [7]. Neste trabalho, McCulloch e Pitts realizaram o primeiro modelamento matemático inspirado no neurônio biológico, resultando assim na constituição do neurônio artificial. Vários pesquisadores continuaram o trabalho de desenvolvimento de modelos matemáticos baseados no neurônio biológico, gerando uma série de topologias e algoritmos de aprendizado novos. Entre as linhas de pesquisa que surgiram, destaca-se o trabalho de Frank Rosenblatt [8], que no período de 1957 à 1958, desenvolveu o primeiro neuro-computador, denominado Mark I *Perceptron*, idealizando o modelo básico do *Perceptron*. O modelo do *Perceptron* despertou interesse devido sua capacidade em reconhecer padrões simples. Em 1960, Widrow e Hoff [9] desenvolveram um tipo de rede denominada ADALINE. A palavra ADALINE é a abreviatura de *ADaptiveLINearElement*. Posteriormente foi proposto o MADALINE (múltipla ADALINE), que é uma rede cujo aprendizado é baseado na chamada “Regra Delta”, também conhecida como algoritmo de aprendizado LMS (*LeastMean Square*).

Após estes trabalhos, muitos pesquisadores da época ficaram incentivados a realizar trabalhos nesta linha. Porém, no ano de 1969, a neuro-computação sofreu um duro impacto com a publicação do livro “Perceptrons – Na Introduction to Computation Geometry”, dos

autores Minsky e Papert [10]. Neste livro, Minsky e Papert fazem críticas e mostram a limitação de redes neurais com um único nível, como o Perceptron e o ADALINE, em aprender o padrão de uma função lógica simples como o XOR (OU-Exclusivo). A partir da publicação deste livro, houve um período em que as pesquisas na área de redes neurais artificiais praticamente ficaram paralisadas.

Somente nos anos 80, os pesquisadores voltaram a ter interesse nesta área. A retomada das pesquisas se deve a diversos fatores, tais como o desenvolvimento de computadores com maior capacidade de processamento e a criação de algoritmos de aprendizado mais eficientes. Nesta época um trabalho de grande destaque, o qual trouxe muitos pesquisadores para área de redes neurais artificiais, foi o artigo publicado pelo físico John Hopfield, intitulado “Neural Network and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities” [11]. Outro destaque importante desta época foi o livro de Rumelhart, Hinton e Williams, intitulado “Parallel Distributed Processing”, publicado em 1986 [12]. Neste livro, os autores desenvolveram um algoritmo que permitia ajustar os pesos em uma rede com mais de um nível, solucionando inclusive o antigo problema de aprendizado dos padrões da função lógica XOR (OU-Exclusivo). O algoritmo, chamado de “Backpropagation”, reascendeu ainda mais as pesquisas em redes neurais artificiais. Mais recentemente, podem-se destacar importantes trabalhos na área de redes neurais artificiais, tais como em robótica [13], em controle de processos [14], em reconhecimento de padrões [15], e em processamento de sinais [16].

4.3 . O NEURÔNIO BIOLÓGICO

O neurônio biológico é uma célula que pode ser dividida em três partes, que são o corpo da célula, os dendritos e o axônio. O corpo do neurônio mede alguns milésimos de milímetros e os dendritos apresentam poucos milímetros de comprimento. O axônio pode ser mais longo. Os dendritos têm como funções, receber informações, ou impulsos nervosos, provenientes de outros neurônios, e conduzi-las até o corpo celular onde a informação é processada e novos impulsos são gerados. Estes impulsos são transmitidos a outros neurônios, passando pelo axônio, e atingindo os dendritos dos neurônios seguintes.

O contato entre a terminação axônica de um neurônio e o dendrito de outro é chamado sinapse. São pelas sinapses que os neurônios se unem, formando as redes neurais. As sinapses funcionam como válvulas, sendo capazes de controlar a transmissão de impulsos, isto é, o fluxo da informação entre os neurônios da rede neural. O efeito das sinapses é variável, e é esta variação que dá ao neurônio a capacidade de adaptação. Na Figura 4.1 tem-se uma ilustração de um neurônio biológico.

Figura 4.1 - Representação de um neurônio biológico.

Os sinais das conexões sinápticas são passados para o corpo do neurônio, onde são comparados com outros sinais recebidos pelo neurônio. Se determinado percentual desses sinais em um intervalo curto de tempo é suficientemente alto, a célula “dispara”, produzindo um impulso que é transmitido para as células seguintes. Este sistema simples é responsável pela maioria das funções realizadas pelo cérebro humano, o qual tem em média 10^{11} neurônios interligados por 1014 sinapses. A capacidade de solucionar funções complexas surge com a operação em paralelo de todos estes neurônios e sinapses do cérebro.

4.4. O NEURÔNIO ARTIFICIAL DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Na realidade, o modelo de neurônio, proposto por McCulloch e Pitts em 1943 [7], é um modelo simplificado do que se sabia à respeito do neurônio biológico naquela época, e até hoje o mesmo é utilizado na maioria das arquiteturas neurais. A descrição matemática resultou em um modelo com n terminais de entrada, ou seja, $x_1, x_2, \dots, x_n$ (que representam os dendritos), e apenas um terminal de saída y (que representa o axônio). Para simular o comportamento das sinapses, os terminais de entrada do neurônio são influenciados por pesos sinápticos dados por $w_1, w_2, \dots, w_n$, cujos valores podem ser positivos ou negativos. O efeito de uma sinapse particular i no neurônio é dado pela multiplicação de x_i por w_i . Portanto, cada neurônio da rede pode ser modelado conforme mostra a figura 4.2.

Figura 4.2 – Esquema do neurônio artificial.

O modelo matemático que descreve o comportamento do neurônio artificial é expresso pela seguinte equação:

$$y = g\left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + b\right)$$

onde:

- n é o número de entradas do neurônio;
- w_i é o peso associado com a i -ésima entrada;
- b é o limiar associado ao neurônio;

x_i é a i -ésima entrada do neurônio;
 $g(.)$ é a função de ativação do neurônio;
 y é a saída do neurônio.

Assim sendo, um neurônio artificial opera da seguinte forma:

- a) Os sinais são apresentados à entrada;
- b) Cada sinal é multiplicado por um peso que representa o seu nível de relevância na saída da unidade;
- c) É feita uma soma ponderada dos sinais, resultando assim em um nível de atividade;
- d) Caso este nível de atividade exceda certo limite (threshold), então a unidade produz uma saída.

4.5. FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO DO NEURÔNIO ARTIFICIAL

A função de ativação é a responsável pelo processamento do conjunto de informações recebidas. É também a função de ativação que é incumbida pela saída do neurônio, podendo assumir valores do tipo:

- Binários (0 ou 1);
- Bipolares (-1 ou 1);
- Reais.

Durante a etapa de treinamento das redes neurais artificiais, ao final de cada treinamento, podem-se alterar os principais parâmetros da rede de modo a buscar uma configuração de rede eficiente. Um dos parâmetros que pode ser alterado é a função de ativação. As principais funções de ativação utilizadas são:

4.5.1. FUNÇÃO DEGRAU (BINÁRIA)

A função degrau é definida por:

$$g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u \geq 0 \\ 0, & \text{se } u < 0 \end{cases}$$

Ou seja, se o nível de atividade interna do neurônio for um valor positivo ou igual a zero, a saída assumirá o valor 1; caso contrário, assumirá o valor 0. A figura 4.3 mostra a representação gráfica desta função.

Figura 4.3 – Função degrau (binária).

4.5.2. Função Degrau (Bipolar)

Esta função é definida por:

$$g(u) = \begin{cases} +1, & \text{se } u \geq 0 \\ -1, & \text{se } u < 0 \end{cases}$$

Assim como a função de degrau binária, se o nível de atividade interna do neurônio for um valor positivo ou igual a zero, a saída assumirá o valor 1; porém, neste caso, se o nível de atividade interna do neurônio for um valor negativo, a saída do neurônio assumirá o valor -1. A Figura 4.4 mostra a representação gráfica desta função.

Figura 4.4 – Função degrau (bipolar).

4.5.3. Função Rampa

A função rampa é definida por:

$$g(u) = \begin{cases} +1, & \text{se } u \geq a \\ u, & \text{se } -a < u < a \\ -1, & \text{se } u \leq -a \end{cases}$$

Nesta função, o valor máximo e mínimo da saída do neurônio é $+1$ e -1 . Os valores de saída poderão variar de acordo com a função $g(u)$ no intervalo definido em $\{-a, a\}$, sendo $a \neq 0$. Na figura 4.5, tem-se uma representação gráfica desta função.

Figura 4.5 – Função rampa.

4.5.4. Função Sigmóide

A definição da função sigmóide é dada por:

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{(-\beta u)}}$$

O parâmetro β desta função define a suavidade ou grau de inclinação da curva da função sigmóide. A saída no neurônio assumirá valores entre 0 e 1. A figura 4.6 mostra a representação gráfica desta função.

Figura 4.6 – Função sigmóide.

4.5.5. Função Tangente Hiperbólica

A função tangente hiperbólica é definida por:

$$g(u) = \tanh(u) = \frac{1 - e^{-u}}{1 + e^{-u}}$$

Usando a função tangente hiperbólica, a saída do neurônio assumirá valores positivos e negativos, oscilando no domínio de -1 a 1 . Graficamente, esta representação pode ser ilustrada através da figura 4.7.

Figura 4.7 – Função tangente hiperbólica.

4.6. CAMADAS DE UMA REDE NEURAL ARTIFICIAL

Basicamente, a estrutura de uma rede neural artificial se divide em três camadas, que são a camada de entrada, as camadas intermediárias (ou ocultas), e a camada de saída.

a) Camada de Entrada

Esta camada é responsável pelo recebimento das informações e é onde os padrões são inicialmente apresentados à rede.

b) Camadas Intermediárias ou Ocultas

São estas camadas as responsáveis pela extração das características do processo ou sistema ao qual se está inferindo. Quase todo o processamento da rede é realizado nestas camadas.

c) Camada de Saída

A camada de saída é responsável pela apresentação do resultado alcançado, o qual foi processado através de todas as camadas da rede. A figura 4.8 mostra uma representação das camadas de uma rede neural artificial.

Figura 4.8 – Representação das camadas de uma rede neural artificial.

4.7. TOPOLOGIAS DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Outro fator muito importante na utilização de redes neurais é a escolha da topologia da rede. A modelagem da topologia da rede está diretamente ligada à configuração das interligações entre os neurônios. Desta forma, a topologia da rede escolhida tem reflexos diretos nas características e propriedades apresentadas pelo modelo. A topologia também está intimamente ligada ao algoritmo de treinamento. Basicamente, a estrutura de uma rede neural artificial se divide em três partes:

As principais topologias ou arquiteturas de redes neurais artificiais são as seguintes:

a) Redes *FeedForward* (Camada Única)

Esta topologia caracteriza-se por ter uma camada de entrada e uma única camada de neurônios que é a própria camada de saída. Esta é a configuração utilizada pelo Perceptron e ADALINE. Estas redes são aplicadas, principalmente, em reconhecimento de padrões e em

memórias associativas. Através da figura 4.9 pode-se visualizar a representação gráfica desta rede, a qual é composta de n entradas e m saídas.

Figura 4.9 – Representação de uma rede FeedForward (camada única).

b) Redes *FeedForward* (Multicamadas)

Esta rede se diferencia da anterior por possuir uma ou mais camadas escondidas ou intermediárias. Nesta rede as informações são recebidas pela camada de entrada, processadas pela camada escondida, e apresentadas pela camada de saída. Geralmente, esta topologia é aplicada em reconhecimento de padrões e como aproximador universal de funções, uma vez que se pode aproximar funções não-lineares. As principais redes que usam esta topologia são o *ADALINE*, o *Perceptron* multicamadas e a de Função Base Radial. A figura 4.10 mostra uma representação desta topologia.

Figura 4.10 – Representação de uma rede FeedForward (multicamadas).

c) Redes Recorrentes

As redes recorrentes se diferenciam por terem realimentação entre neurônios de camadas diferentes. Estas redes têm capacidade de “lembrar” seu comportamento com relação aos padrões anteriormente apresentados, e desta forma, processar sequência de informações. São aplicadas em sistemas dinâmicos, séries temporais, previsões, identificação e controle. Este tipo de topologia é utilizado principalmente pelas redes Perceptron com realimentação e redes de Hopfield. A representação da topologia de uma rede recorrente é mostrada através da figura 4.11.

Figura 4.11 – Representação de uma rede recorrente.

4.8. TREINAMENTO DE REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

As redes neurais artificiais se destacam por possuírem uma capacidade de aprender a partir de seu ambiente, e em seguida, generalizar soluções. A utilização de uma rede neural artificial supervisionada sempre se inicia através do processo de treinamento ou aprendizagem. Durante esta fase a rede extrai as características do processo ou sistema que lhe está sendo apresentada. Existe um processo de ajuste dos pesos das conexões entre as unidades de processamento, que guardam o conhecimento que a rede adquiriu do ambiente que lhe foi apresentado. A etapa de treinamento só termina quando a rede neural artificial consegue generalizar soluções, dentro de um nível satisfatório, para o problema apresentado.

Na fase de treinamento, os parâmetros da rede são alterados de acordo com um conjunto de regras predefinidas. Este conjunto de regras é chamado de algoritmo de aprendizagem. Existem vários tipos de algoritmos de aprendizagem que são usados em redes neurais artificiais. O que diferencia um de outro é a forma com que cada um altera os pesos sinápticos da rede. Portanto, a alteração dos pesos sinápticos da rede, ou seja, o processo de treinamento ou aprendizagem está fortemente ligado ao tipo de algoritmo e rede utilizados.

Uma “época de treinamento” é definida como sendo a apresentação à rede de todos os pares (entrada e saída) do conjunto de treinamento. Normalmente, a rede é treinada com cerca de 80% a 90% dos dados coletados, o restante dos dados, de 10% a 20%, são usados para validação da modelagem neural proposta. Os dois principais processos de aprendizagem são os seguintes:

a) Aprendizado Supervisionado

Neste aprendizado a saída desejada é fornecida à rede, juntamente com o estímulo (sinal) de entrada correspondente. A rede faz o mapeamento das variáveis, buscando a generalização para o problema. Os parâmetros da rede são alterados por um agente externo ou “supervisor” até que a generalização seja satisfatória, isto é, até que a diferença entre a saída fornecida pela rede e a saída desejada se minimize para um valor aceitável.

b) Aprendizado Não Supervisionado

Neste caso, não existe uma saída específica relacionada ao estímulo de entrada, e não existe também a presença do agente externo ou “supervisor”. A rede se organiza de forma a buscar características similares nos subconjuntos que lhe são apresentados. Os pesos

sinápticos da rede são alterados pelo algoritmo de treinamento, de forma que o sistema crie sua própria representação para os estímulos de entrada. Portanto, quanto mais “evidente” forem as particularidades marcantes da população de entrada, mais “fácil” será a aprendizagem da rede, e vice-versa.

4.9. CONCLUSÕES

Para este trabalho optamos por utilizar as redes Perceptrons de uma e duas camadas, pela sua versatilidade, sendo que sua topologia é similar àquela apresentada na Figura 4.10. Nas redes Perceptrons multicamadas, as “tarefas” são distribuídas através das camadas. Os estímulos ou sinais são apresentados à rede na camada de entrada. A camada intermediária extrai as informações e as codificam através dos pesos sinápticos, formando assim uma representação própria do ambiente externo. Finalmente, a camada de saída recebe os estímulos da camada intermediária, mapeando o padrão de resposta que será a saída da rede.

CAPÍTULO 5

ESTIMAÇÃO DE VAZÕES EM SÉRIES HISTÓRICAS

5.1. APRESENTAÇÃO DOS DADOS QUE SERÃO ADOTADOS

Para o desenvolvimento de metodologia baseada em redes neurais artificiais para reconstrução de séries históricas para fins de estudos hidrológicos e constituição do conjunto de treinamento para as RNA's serão utilizados os dados do rio Santa Cruz, conforme tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados históricos de vazão no rio Santa Cruz.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10.8	9.38	10.5	11.8	16	21.1	55.6
1985	181	41	38.8	17.1	10.9	8.77	7.58	6.51	7.01	20.7	27.9	72.9
1986	90.5	49.8	13.8	8.28	6.89	5.97	8.01	6.99	4.75	8.13	16.7	35
1987	22.2	12.9	36.9	26.2	11.4	7.58	6.35	5.12	8.23	9.3	20.6	144
1988	27.8	43.8	51.4	35.6	11.4	9.12	7.71	6.47	4.97	13.8	14.1	56.4
1989	43	50.7	22.6	14.8	7.09	7.51	5.89	5.03	7.02	10.9	32.1	229
1990	49.5	46.9	23.5	13.1	9.83	7.37	12.7	8.08	7.59	7.3	19.5	16.4
1991	54.1	38.6	188	38.3	16.4	12.7	10.2	8.48	8.92	11.1	53.2	38.7
1992	191	203	36.6	29.7	18.2	12.7	9.79	8.57	8.97	27.1	130	118
1993	49.9	82.8	26.8	23.8	14.3	11.3	9.15	8.23	7.3	14.4	12.2	61.8
1994	103	24.2	107	28.7	17.4	15.8	11.7	8.51	6.31	9.07	52.3	41.7
1995	24.7	51.7	22.1	17.8	12.7	7.89	6.49	5.01	4.36	8.66	24.5	58.4
1996	18.9	15.4	16.9	10.8	6.62	5.02	4.19	3.61	3.59	6.97	45.4	23.1
1997	63.3	23.2	95.1	33.2	14.8	13.4	7.37	5.63	5.41	7.13	16.7	40.2
1998	27	59.6	19.6	9.92	7.69	5.41	4.44	3.64	2.7	13.2	90.8	46.4
1999	33.8	13.8	58.3	9.93	5.53	4.61	4.02	3.54	3.51	4.27	30.7	43.5

2000	41.9	45.8	46.7	8.99	5.96	5.16	4.73	4.32	10.5	5.54	26.2	41
2001	17.5	6.88	16.3	5.63	6.2	4.99	3.98	3.72	3.74	7.58	16.1	25.5
2002	38.3	39.3	23.2	7.49	5.5	5.04	4.51	3.79	4.81	3.46	27.7	0
2003	87	17.8	31.3	11.7	7.33	5.39	4.89	4.46	4.04	4.31	13.3	21.9
2004	49.5	63.4	0	0	0	0	0	5.33	4.5	5.44	7.24	53.4
2005	55.6	57.8	77.8	14.8	9.54	7.32	6	5.16	4.71	4.2	51.7	84.4

5.2. DETALHAMENTO DO PROBLEMA E CONSTITUIÇÃO DOS CONJUNTOS DE TREINAMENTO

Na Tabela 1 os dados destacados e com vazões nulas representam dados desconhecidos e que devem ser recuperados de maneira a permitir o uso efetivo da série histórica em questão.

Tendo como base os valores conhecidos procedeu-se com o desenvolvimento de redes neurais para estimação de valores desconhecidos tendo como base as vazões no entorno do valor a ser estimado. Assim, constitui-se um conjunto de treinamento composto por 8 variáveis de entrada e uma de saída. As 8 variáveis de entrada correspondem às vazões vizinhas ao valor de vazão que se deseja estimar sendo esta, portanto, a variável de saída. Para melhor exemplificar a regra de formação do conjunto de dados para projeto das redes neurais consideram-se as vazões nos meses de abril a junho para os anos de 1994 a 1996 conforme destacado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dados para exemplificar a criação dos padrões de treinamento para as redes neurais artificiais.

	Abr	Mai	Jun
1994	28.7	17.4	15.8
1995	17.8	12.7	7.89
1996	10.8	6.62	5.02

Tendo como base os dados da Tabela 5.2 o valor atribuído à variável de saída da RNA será a vazão de Maio de 1995, ou seja, 12.7. Já as variáveis de entrada serão compostas por todas as vazões que são vizinhas a essa vazão, ou seja, tem-se o seguinte vetor para as entradas:

(28.7 17.4 15.8 17.8 7.89 10.8 6.62 5.02)

Assim, considerando-se os dados apresentados por meio da Tabela 1 obteve-se um conjunto de treinamento inicial de 232 padrões. Contudo, a rede neural deve ser capaz de fazer estimativas de vazões diante de ausências nas próprias variáveis de entrada. Assim, o conjunto de treinamento fora expandido incluindo-se vazões nulas em número de até 3. Essa inclusão faz com que o conjunto de treinamento passe a possuir 21576 padrões de treinamento. Esse número pode ser calculado da seguinte forma:

$$n_{Total} = (C_8^3 + C_8^2 + C_8^1 + C_8^0)N$$

Onde n_{Total} é o número de padrões no conjunto de treinamento, N é o número de padrões obtidos dos dados disponíveis e C_k^m é o número de combinações completas o qual pode ser calculado por:

$$C_k^m = \frac{(m + k - 1)!}{(n - 1)! k!}$$

5.3. ASPECTOS METODOLÓGICOS RELACIONADOS AO PROJETO DE REDES NEURAIIS

Tendo como base esse conjunto de dados disponíveis para o treinamento de RNA's procedeu-se com a fase de projeto das mesmas. Na fase de projeto o objetivo seria de determinar a topologia de rede que melhor mapeasse o problema e, em face dessa determinação, treinar à exaustão as redes selecionadas para então, por fim, verificar seu comportamento frente à recuperação de informações desconhecidas em séries hidrológicas.

Dessa forma, além de se testar o comportamento de RNA's com uma camada escondida testou-se também, dada a natureza não-linear do mapeamento entre o espaço das entradas e o da saída, RNA's com duas camadas escondidas. O detalhamento dos resultados alcançados será feito nas seções seguintes.

5.3.1. PROJETO DE RNA COM UMA CAMADA OCULTA PARA RECUPERAÇÃO DE DADOS EM SÉRIES HIDROLÓGICAS

Para se testar o comportamento de RNA's com uma camada oculta na recuperação de dados de séries hidrológicas optou-se por avaliar o comportamento supondo um número de neurônios nessa camada escondida entre 2 e 15. Cada uma das topologias fora testada 30

vezes, pois, como a iniciação dos pesos sinápticos é aleatória, essa prática permite quantificar com melhor significância estatística como se comporta a capacidade da RNA em extrair o conhecimento em função do número de neurônios na camada escondida ou, em outras palavras, em função do número de parâmetros livres da RNA.

5.3.2. PROCESSO DE TREINAMENTO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Ao todo foram criadas 420 RNA's as quais foram treinadas com 15% do total do conjunto de treinamento, ou seja, 3237 padrões por um número máximo de épocas igual a 100. O comportamento da média do módulo do erro relativo em função do número de neurônios para os dados de treinamento é apresentado por meio da Figura 5.1.

Figura 5.1 – Comportamento do erro relativo médio em função do número de neurônios na camada escondida.

Pode-se observar por meio da Figura 5.1 que o erro médio tende a cair em função do número de neurônios quando se considera os dados de treinamento na avaliação da RNA. Contudo, o objetivo dessa primeira avaliação deve ser a de verificar a capacidade da rede em

generalizar o conhecimento, ou seja, a RNA deve ser avaliada com os dados não empregados no treinamento inicial. Procedendo dessa forma o erro relativo médio será como o apresentado por meio da Figura 5.2.

Figura 5.2 – Comportamento do erro relativo médio para os dados de teste em função do número de neurônios.

Por meio da Figura 5.2 é possível verificar que o decaimento do erro em função do aumento de parâmetros livres na RNA não se repete quando se empregam os dados de teste, ou seja, aqueles que não constituíam o conjunto de treinamento inicial.

Assim, dentre esse conjunto de 420 RNA escolheu-se as 42, 10% do total, que menor erro apresentaram frente aos dados de teste para serem submetidas a uma nova fase de treinamento. Nessa segunda fase de treinamento apresentou-se às RNA's 50% dos dados totais por um número de épocas de treinamento máximo igual a 10.000. O comportamento de cada umas dessas 42 RNA frente aos dados de teste pode ser analisado por meio dos dados apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados de teste das 42 RNA's de uma camada.

Índice da RNA	Número de neurônios	Número de pesos sinápticos	Erro	Desvio padrão do erro	Percentil de 5%	Percentil de 95%	Intervalo de confiança
9	13	131	11.98	22.89	-27.63	31.32	58.96
25	14	141	12.07	23.01	-26.32	34.07	60.39
14	15	151	12.18	22.04	-29.20	32.59	61.79
18	13	131	12.19	22.61	-27.61	34.01	61.62
5	15	151	12.34	23.15	-27.15	31.87	59.02
12	9	91	12.44	23.90	-26.93	35.00	61.93
3	11	111	12.44	23.68	-29.33	33.94	63.27
1	9	91	12.46	24.40	-25.97	35.39	61.36
4	13	131	12.49	23.38	-29.86	34.33	64.18
16	12	121	12.60	23.51	-29.53	35.50	65.03
19	13	131	12.60	23.41	-28.85	33.78	62.64
26	14	141	12.62	23.76	-28.54	35.50	64.04
7	11	111	12.62	24.67	-27.53	30.39	57.92
24	10	101	12.70	23.34	-29.16	35.47	64.63
36	15	151	12.73	24.42	-30.80	35.31	66.10
23	15	151	12.75	23.95	-30.28	35.13	65.40
40	11	111	12.78	24.01	-30.11	36.48	66.60
20	13	131	12.85	23.64	-30.57	35.95	66.53
2	8	81	12.86	24.24	-29.57	35.93	65.50
33	11	111	12.95	24.50	-29.93	37.45	67.38
13	7	71	12.96	24.09	-28.33	38.44	66.77
11	11	111	13.07	24.24	-28.27	33.40	61.67
17	9	91	13.08	24.50	-27.33	33.72	61.05
41	11	111	13.08	24.47	-32.24	35.08	67.32
22	7	71	13.12	25.15	-31.02	35.18	66.20
37	12	121	13.13	24.29	-33.17	36.12	69.29
15	11	111	13.17	25.03	-29.91	37.79	67.70
8	6	61	13.21	24.36	-28.38	36.31	64.69
29	8	81	13.23	24.49	-29.64	34.79	64.42
39	11	111	13.23	24.40	-32.48	36.11	68.58
32	10	101	13.35	25.49	-31.61	35.68	67.28
38	6	61	13.35	24.12	-27.31	34.36	61.67
27	9	91	13.35	25.26	-33.96	35.88	69.84
42	3	31	13.47	26.22	-29.27	42.71	71.97
35	3	31	13.48	26.34	-27.55	38.28	65.83
6	9	91	13.50	25.81	-30.47	36.41	66.87
30	5	51	13.59	25.37	-30.29	41.82	72.10
10	5	51	13.65	26.00	-29.65	38.87	68.52
21	15	151	13.73	41.47	-28.68	36.99	65.66
31	2	21	13.73	26.98	-30.41	39.49	69.90

Índice da RNA	Número de neurônios	Número de pesos sinápticos	Erro	Desvio padrão do erro	Percentil de 5%	Percentil de 95%	Intervalo de confiança
28	5	51	13.75	26.20	-29.96	41.01	70.97
34	7	71	13.86	26.11	-30.08	38.87	68.95

Os dados de desempenho das RNA's de uma camada escondida apresentados por meio da Tabela 5.3 encontram-se ordenados em ordem crescente do erro de forma que a RNA com melhor desempenho é a de índice número 9 a qual é possuidora de 13 neurônios na camada escondida.

Na seção seguinte serão apresentados os resultados alcançados com RNA's com duas camadas escondidas.

5.3.3. PROJETO DE RNA COM DUAS CAMADAS OCULTA PARA RECUPERAÇÃO DE DADOS EM SÉRIES HIDROLÓGICAS

As RNA's com duas camadas escondidas foram testadas tendo de 2 a 15 neurônios em cada uma das camadas. Contudo, a forma de criar o conjunto de redes a serem avaliadas foi distinto. Caso fosse empregada a mesma metodologia para as redes de uma única camada o número de redes a serem inicialmente testadas seria de 5880, número esse resultado do produto do número de combinações possíveis, 196 (14 x 14), por 30 que vem a ser o número de RNA's testadas para cada topologia de RNA. Dessa forma, optou-se por criar aleatoriamente 500 RNA's com as características informadas inicialmente e a partir dessas proceder como feito para as RNA's como uma camada escondida.

Como o objetivo de apresentar como o erro relativo médio se comporta em função do número de parâmetros livres apresenta-se a Figura 5.3.

Figura 5.3 – Comportamento do erro absoluto médio em função do número de parâmetros livres para a RNA's com duas camadas escondidas.

5.3.4. PROCESSO DE TREINAMENTO E AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Assim, tal como feito para as RNA's com uma camada escondida, escolheu-se as 50, 10% do total, que melhor erro apresentaram frente aos dados de teste para serem submetidas a uma nova fase de treinamento. Nessa segunda fase de treinamento apresentou-se às RNA's 50% dos dados totais por um número de épocas de treinamento máximo igual a 10.000. O comportamento de cada umas dessas 50 RNA frente aos dados de teste pode ser analisado por meio dos dados apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dados de teste das 50 RNA's de duas camadas.

Índice da RNA	Número de neurônios camada 1	Número de neurônios camada 2	Número de pesos sinápticos	Erro	Desvio padrão do erro	Percentil de 5%	Percentil de 95%	Intervalo de confiança
10	7	8	136	11.35	22.22	-24.90	31.21	56.11
30	9	10	192	11.89	23.45	-26.07	31.15	57.22
1	9	8	170	11.91	22.81	-27.72	31.61	59.33
23	7	7	127	12.05	23.31	-27.76	33.45	61.22
26	9	7	159	12.06	23.15	-26.92	31.39	58.30
18	10	5	151	12.08	24.02	-27.65	32.71	60.37
15	4	10	97	12.10	22.69	-27.20	32.14	59.34
27	6	10	135	12.13	24.35	-26.34	30.02	56.36
4	10	10	211	12.13	23.81	-25.63	31.95	57.59
7	5	9	109	12.26	24.58	-26.72	31.56	58.27
12	7	6	118	12.28	24.12	-25.19	31.05	56.24
14	8	6	133	12.30	24.14	-25.62	34.22	59.84
34	5	7	95	12.30	24.25	-26.23	32.38	58.61
2	4	9	91	12.30	24.07	-27.53	34.19	61.72
5	8	6	133	12.33	24.92	-25.74	32.74	58.48
36	8	10	173	12.34	24.16	-27.48	28.77	56.25
13	8	6	133	12.35	25.30	-27.47	31.96	59.43
19	10	10	211	12.39	24.68	-28.58	31.36	59.93
45	10	6	163	12.43	25.42	-26.03	30.02	56.05
33	7	6	118	12.48	25.07	-26.84	35.02	61.86
50	8	7	143	12.51	24.27	-26.86	35.35	62.22
29	9	8	170	12.52	24.35	-29.61	29.59	59.19
42	7	5	109	12.53	24.62	-27.38	31.59	58.97
8	9	2	104	12.54	24.65	-27.65	30.78	58.43
41	9	9	181	12.60	25.68	-27.25	32.24	59.48
20	8	2	93	12.65	25.75	-27.72	30.81	58.53
37	4	10	97	12.66	24.70	-28.72	35.61	64.32
39	6	5	95	12.70	25.40	-27.87	34.59	62.46
16	4	10	97	12.81	24.72	-27.44	32.41	59.84
47	7	5	109	12.82	25.63	-27.50	33.78	61.28
17	8	9	163	12.85	25.08	-28.61	34.51	63.12
11	7	6	118	12.85	24.83	-31.50	36.16	67.66
22	3	10	78	12.89	25.78	-28.49	36.59	65.08
24	7	9	145	12.90	26.61	-27.74	35.85	63.58

Índice da RNA	Número de neurônios camada 1	Número de neurônios camada 2	Número de pesos sinápticos	Erro	Desvio padrão do erro	Percentil de 5%	Percentil de 95%	Intervalo de confiança
21	7	4	100	12.90	25.98	-28.88	33.75	62.63
35	8	10	173	12.92	25.25	-28.84	33.66	62.50
46	7	2	82	13.00	24.62	-29.62	34.56	64.18
38	5	7	95	13.04	26.21	-28.53	35.80	64.33
43	3	10	78	13.05	26.15	-27.90	34.97	62.87
31	4	5	67	13.07	25.98	-27.02	37.05	64.07
6	5	6	88	13.14	26.69	-28.07	36.12	64.19
49	6	10	135	13.15	25.68	-30.13	34.33	64.46
28	3	6	58	13.20	25.37	-29.89	31.88	61.77
32	5	4	74	13.31	26.38	-29.56	41.28	70.83
44	7	7	127	13.32	26.95	-28.72	33.77	62.49
25	6	3	79	13.34	26.91	-29.57	38.18	67.76
9	4	5	67	13.42	26.59	-30.31	40.52	70.82
40	3	5	53	13.50	26.25	-29.54	37.12	66.66
48	3	4	48	13.98	33.64	-28.41	41.40	69.81
3	4	2	49	14.00	27.44	-31.09	41.71	72.80

Por meio da Tabela 5.4 é possível verificar que a RNA de índice 10, composta por 7 neurônios na primeira camada escondida e 8 na segunda, apresentou o menor erro após a segunda fase de treinamento. Além disso, a referida rede teve um melhor erro associado ao seu desempenho se comparado com a melhor RNA de uma camada escondida. Assim, essa RNA fora a escolhida na avaliação dos estudos de caso apresentados na seção seguinte.

5.4. APLICAÇÃO DA REDE NEURAL EM CASOS SIMULADOS COMPARADOS COM A METODOLOGIA CONVENCIONAL

Para testarmos a eficiência da rede desenvolvida numa aplicação pratica, utilizamos os dados do rio Santa Cruz, apresentados na tabela 5.1, para fazermos nossa análise suprimimos alguns dados dessa tabela de três formas diferentes, criando dessa maneira três novos conjuntos de dados que denominamos de caso 1, caso 2 e caso 3, sendo apresentados nas tabelas 5.5,5.6 e 5.7 respectivamente.

Tabela 5.5 – Caso 1 (tabela de dados do rio Santa Cruz com supressão de alguns dados).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	4,75	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	43,8	51,4	35,6	11,4	9,12	7,71	6,47	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	7,51	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	7,59	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	0	0	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	53,2	38,7
1992	191	203	36,6	0	0	12,7	9,79	8,57	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994	103	24,2	107	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	7,89	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	63,3	23,2	95,1	33,2	14,8	13,4	7,37	5,63	5,41	7,13	16,7	40,2
1998	27	59,6	19,6	9,92	7,69	5,41	4,44	3,64	2,7	13,2	90,8	46,4
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	4,61	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5
2000	41,9	45,8	46,7	8,99	5,96	5,16	4,73	4,32	10,5	5,54	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	7,33	5,39	4,89	4,46	4,04	4,31	13,3	21,9
2004	49,5	63,4	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Tabela 5.6 – Caso 2 (tabela de dados do rio Santa Cruz com supressão de alguns dados).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	4,75	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	43,8	51,4	35,6	11,4	9,12	7,71	6,47	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	7,51	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	7,59	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	38,3	16,4	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	53,2	38,7
1992	191	203	36,6	29,7	18,2	12,7	9,79	8,57	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	23,8	14,3	11,3	9,15	8,23	7,3	14,4	12,2	61,8
1994	103	24,2	107	28,7	17,4	15,8	11,7	8,51	6,31	9,07	52,3	41,7
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	7,89	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	4,61	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2000	41,9	45,8	46,7	8,99	5,96	5,16	4,73	4,32	10,5	5,54	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	7,33	5,39	4,89	4,46	4,04	4,31	13,3	21,9
2004	49,5	63,4	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Tabela 5.7 – Caso 3 (tabela de dados do rio Santa Cruz com supressão de alguns dados).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	0	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	0	0	35,6	11,4	9,12	7,71	0	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	0	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	0	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	38,3	16,4	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	0	38,7
1992	191	203	36,6	29,7	18,2	12,7	9,79	0	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	0	14,3	11,3	9,15	8,23	7,3	14,4	12,2	61,8
1994	103	24,2	107	28,7	17,4	15,8	11,7	8,51	6,31	9,07	0	41,7
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	0	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	63,3	0	95,1	33,2	14,8	13,4	7,37	0	5,41	7,13	16,7	40,2
1998	27	59,6	19,6	0	7,69	5,41	4,44	3,64	2,7	0	90,8	46,4
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	0	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5
2000	41,9	0	46,7	8,99	5,96	5,16	0	4,32	10,5	0	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	0	5,39	4,89	4,46	4,04	0	13,3	21,9
2004	49,5	63,4	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Dando prosseguimento ao experimento utilizamos a rede neural desenvolvida anteriormente que obteve o melhor desempenho para estimar os dados suprimidos para os três casos apresentados, obtendo os seguintes resultados são apresentados nas tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 respectivamente.

Tabela 5.8 – Caso 1, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pela rede neural.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	4,75	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	43,8	51,4	35,6	11,4	9,12	7,71	6,47	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	7,51	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	7,59	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	43,13	12,97	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	53,2	38,7
1992	191	203	36,6	38,84	34,23	12,7	9,79	8,57	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	36,83	24,29	10,57	8,90	8,28	9,44	28,32	35,13	39,69
1994	103	24,2	107	24,45	10,28	7,83	6,58	5,91	4,91	3,87	37,39	45,76
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	7,89	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	63,3	23,2	95,1	33,2	14,8	13,4	7,37	5,63	5,41	7,13	16,7	40,2
1998	27	59,6	19,6	9,92	7,69	5,41	4,44	3,64	2,7	13,2	90,8	46,4
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	4,61	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5
2000	41,9	45,8	46,7	8,99	5,96	5,16	4,73	4,32	10,5	5,54	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	7,33	5,39	4,89	4,46	4,04	4,31	13,3	21,9
2004	49,5	63,40	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Tabela 5.9 – Caso 2, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pela rede neural..

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	4,75	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	43,8	51,4	35,6	11,4	9,12	7,71	6,47	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	7,51	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	7,59	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	38,3	16,4	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	53,2	38,7
1992	191	203	36,6	29,7	18,2	12,7	9,79	8,57	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	23,8	14,3	11,3	9,15	8,23	7,3	14,4	12,2	61,8
1994	103	24,2	107	28,7	17,4	15,8	11,7	8,51	6,31	9,07	52,3	41,7
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	7,89	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	26,51	15,84	8,72	7,15	6,22	5,65	5,36	5,21	5,51	9,55	20,13	26,33
1998	14,98	47,53	35,04	33,34	8,62	5,84	5,34	5,06	4,81	-16,05	-7,71	45,45
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	4,61	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2000	41,9	45,8	46,7	8,99	5,96	5,16	4,73	4,32	10,5	5,54	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	7,33	5,39	4,89	4,46	4,04	4,31	13,3	21,9
2004	49,5	63,4	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Tabela 5.10 – Caso 3, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pela rede neural.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	9,64	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	43,76	42,95	35,6	11,4	9,12	7,71	8,10	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	10,84	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	10,11	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	38,3	16,4	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	69,20	38,7
1992	191	203	36,6	29,7	18,2	12,7	9,79	9,96	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	37,39	14,3	11,3	9,15	8,23	7,3	14,4	12,2	61,8
1994	103	24,2	107	28,7	17,4	15,8	11,7	8,51	6,31	9,07	56,48	41,7
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	15,73	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	63,3	33,95	95,1	33,2	14,8	13,4	7,37	7,06	5,41	7,13	16,7	40,2
1998	27	59,6	19,6	37,61	7,69	5,41	4,44	3,64	2,7	5,13	90,8	46,4
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	7,18	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5
2000	41,9	48,63	46,7	8,99	5,96	5,16	6,63	4,32	10,5	16,46	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	7,45	5,39	4,89	4,46	4,04	6,90	13,3	21,9
2004	49,5	63,4	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Dando prosseguimento ao experimento utilizamos as técnicas convencionais para também estimar os dados suprimidos para os mesmos três casos apresentados, obtendo os resultados apresentados nas tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 respectivamente.

Tabela 5.11 – Caso 1, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pelas técnicas convencionais.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	11,4	9,91	11,2	12,5	17	21,9	57,2
1985	181	43,1	41,2	18,8	11,6	9,31	8,21	7,07	7,85	21,8	28,9	73,9
1986	91,7	51,9	15	8,95	7,46	6,63	8,84	7,81	5,67	9,27	17,7	36,5
1987	23,7	13,9	36,8	24,1	9,36	6,31	5,63	4,76	7,27	8,51	18,7	143
1988	25,5	41,7	49,4	33,2	8,97	7,26	6,39	5,69	4,62	12,3	12	54,6
1989	40,8	48,8	20,3	13,1	6,04	6,37	5,36	4,68	6,33	9,96	30,2	228
1990	47,4	44,8	20,8	10,7	7,84	6,2	11	7,2	6,48	6,63	17,9	14,5
1991	52,5	36,6	187	50,23	16,59	10	8,04	6,83	7,43	9,92	51,4	36,8
1992	190	202	34,8	33,72	24,40	9,96	7,74	6,95	7,67	24,8	129	117
1993	48,4	81,4	24,5	25,07	14,54	10,69	8,38	7,07	7,01	10,26	13,03	32,93
1994	102	21,5	106	44,92	17,57	13,67	10,79	7,83	5,81	4,66	30,22	40,67
1995	22,2	49,9	19,6	15,2	10,3	6,49	5,7	4,66	4,06	8,03	22,4	56,8
1996	16,4	13,5	14,8	9,42	5,79	4,67	3,92	3,41	3,39	6,17	43,6	21,4
1997	61,6	21,4	93,4	30,9	12,1	11,2	6,2	5,17	4,88	6,24	14,8	38,1
1998	24,8	57,9	17,3	8,38	6,61	5	4,13	3,44	2,56	12,4	89,8	44,5
1999	33,5	13,6	58,1	9,8	5,5	4,59	4	3,49	3,43	4,19	30,4	43,3
2000	41,9	45,8	46,7	8,99	5,96	5,16	4,73	4,32	10,5	5,54	26,2	41,2
2001	17,6	6,94	16,4	5,69	6,26	5,02	4,01	3,76	3,79	7,65	16,2	25,6
2002	38,5	39,4	23,3	7,6	5,52	5,05	4,52	3,81	4,84	3,52	27,8	0
2003	87	18	31,4	11,8	7,35	5,4	4,9	4,49	4,05	4,35	13,4	22
2004	49,6	63,5	0	0	0	0	0	5,34	4,5	5,46	7,3	53,5
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Tabela 5.12 – Caso 2, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pelas técnicas convencionais.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	4,75	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	43,8	51,4	35,6	11,4	9,12	7,71	6,47	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	7,51	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	7,59	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	38,3	16,4	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	53,2	38,7
1992	191	203	36,6	29,7	18,2	12,7	9,79	8,57	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	23,8	14,3	11,3	9,15	8,23	7,3	14,4	12,2	61,8
1994	103	24,2	107	28,7	17,4	15,8	11,7	8,51	6,31	9,07	52,3	41,7

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	7,89	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	35,44	18,18	52,05	40,65	20,49	11,87	7,30	5,32	5,63	6,05	12,95	37,02
1998	23,25	39,17	23,14	9,16	7,88	4,76	3,61	2,72	1,91	7,87	36,12	51,13
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	4,61	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5
2000	41,9	45,8	46,7	8,99	5,96	5,16	4,73	4,32	10,5	5,54	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	7,33	5,39	4,89	4,46	4,04	4,31	13,3	21,9
2004	49,5	63,40	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

Tabela 5.13 – Caso 3, tabela do rio Santa Cruz com dados faltantes estimados pelas técnicas convencionais.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1984	0	0	0	0	0	10,8	9,38	10,5	11,8	16	21,1	55,6
1985	181	41	38,8	17,1	10,9	8,77	7,58	6,51	7,01	20,7	27,9	72,9
1986	90,5	49,8	13,8	8,28	6,89	5,97	8,01	6,99	6,92	8,13	16,7	35
1987	22,2	12,9	36,9	26,2	11,4	7,58	6,35	5,12	8,23	9,3	20,6	144
1988	27,8	44,18	70,82	35,6	11,4	9,12	7,71	7,24	4,97	13,8	14,1	56,4
1989	43	50,7	22,6	14,8	7,09	7,30	5,89	5,03	7,02	10,9	32,1	229
1990	49,5	46,9	23,5	13,1	9,83	7,37	12,7	8,08	9,65	7,3	19,5	16,4
1991	54,1	38,6	188	38,3	16,4	12,7	10,2	8,48	8,92	11,1	39,56	38,7
1992	191	203	36,6	29,7	18,2	12,7	9,79	10,27	8,97	27,1	130	118
1993	49,9	82,8	26,8	25,83	14,3	11,3	9,15	8,23	7,3	14,4	12,2	61,8
1994	103	24,2	107	28,7	17,4	15,8	11,7	8,51	6,31	9,07	31,06	41,7
1995	24,7	51,7	22,1	17,8	12,7	9,31	6,49	5,01	4,36	8,66	24,5	58,4
1996	18,9	15,4	16,9	10,8	6,62	5,02	4,19	3,61	3,59	6,97	45,4	23,1
1997	63,3	18,41	95,1	33,2	14,8	13,4	7,37	5,36	5,41	7,13	16,7	40,2
1998	27	59,6	19,6	9,25	7,69	5,41	4,44	3,64	2,7	7,95	90,8	46,4
1999	33,8	13,8	58,3	9,93	5,53	4,73	4,02	3,54	3,51	4,27	30,7	43,5
2000	41,9	36,67	46,7	8,99	5,96	5,16	5,21	4,32	10,5	3,09	26,2	41
2001	17,5	6,88	16,3	5,63	6,2	4,99	3,98	3,72	3,74	7,58	16,1	25,5
2002	38,3	39,3	23,2	7,49	5,5	5,04	4,51	3,79	4,81	3,46	27,7	0
2003	87	17,8	31,3	11,7	10,80	5,39	4,89	4,46	4,04	2,50	13,3	21,9
2004	49,5	63,4	0	0	0	0	0	5,33	4,5	5,44	7,24	53,4
2005	55,6	57,8	77,8	14,8	9,54	7,32	6	5,16	4,71	4,2	51,7	84,4

5.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Colocamos num mesmo gráfico os valores reais que foram suprimidos, assim como os valores estimados por redes neurais e pela metodologia convencional para os três casos apresentados. Analisamos dessa maneira o comportamento tanto dos dados estimados por redes neurais em relação aos dados reais, assim como, o comportamento dos dados estimados pela metodologia convencional em relação aos dados reais. Dessa maneira verificamos a eficiência desses métodos, já que tínhamos conhecimentos dos valores reais que foram suprimidos. Os resultados para os Casos I, II e III são mostrados nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6 respectivamente.

Figura 5.4 – Caso I

Figura 5.5 – Caso II.

Figura 5.6 – Caso III.

Analisando os gráficos obtidos verificamos que no caso 1 e 3 a estimação por redes neurais obteve valores bem próximos aos reais, alcançando um resultado bom, em muitos pontos melhores que a metodologia convencional, já no caso 2 a metodologia convencional foi um pouco melhor, mas é bom frisar que o rio escolhido para estudo, que é o rio Santa Cruz, está localizado numa região abundante de dados, o que melhora o resultado pela metodologia convencional, mas essa situação de abundância de dados não ocorre regularmente, principalmente nas regiões mais ao norte do país.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O objetivo desse capítulo é apresentar as conclusões finais do trabalho, de maneira a conduzir o seu fechamento. Além disso serão apresentadas propostas para trabalhos futuros que façam uso, total ou parcialmente, do desenvolvido neste trabalho.

6.1. CONCLUSÕES

Os resultados, apresentados no Capítulo 5, mostram que para esse exemplo a rede neural utilizada apresentou resultados bem próximos da metodologia convencional. Também é importante frisar que o rio escolhido está numa região com muitas estações com boa quantidade / qualidade de dados, pois nesse caso a metodologia convencional consegue obter bons resultados, já que utilizam os dados de rios vizinhos, mas quando há carência de dados o resultado não é tão bom. Nesse caso as redes neurais podem ter resultados melhores já que não utilizam dados de rios vizinhos. Outro fator a ser considerado é que a forma convencional é uma abordagem que exige um especialista, além do processo ser manual, já a técnica que utiliza redes neurais não exige especialista e por ser automatizada, seu tempo para se ter uma aproximação é muitas vezes mais rápida.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Dentre os futuros trabalhos, correlacionados aos temas desta dissertação, pontua-se os seguintes:

- ❖ Testar o desempenho dessas redes para vários rios de uma mesma região, pois seria interessante desenvolver uma rede que pudesse ser usada pra vários rios da mesma região.
- ❖ Testar outras topologias de redes neurais, buscando uma rede que obtivesse melhores resultados e conseguisse também conseguir estender a série.
- ❖ Desenvolver uma rede que pudesse ter na entrada além dados fluviométricos, também dados pluviométricos, pois em muitas regiões do país temos mais dados pluviométricos.
- ❖ Participar de cursos e eventos específicos da área.
- ❖ Publicar os estudos dos projetos em congressos e revistas pertinentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIB, J. **Gestão de recursos hidroenergéticos**. Brasília: ESAF, 2008.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Estudo de Inventário.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Manual de Inventário Hidroelétrico e Bacias Hidrográficas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2007.

Centrais Elétricas Brasileiras. **Potencial hidrelétrico brasileiro**. Portal de Minas e Energia do Governo Federal, 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme>. Acesso em: 18/10/2013.

ELETROBRÁS. **SISTEMA DE INFORMAÇÕES DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO BRASILEIRO – SIPOT**. Disponível em: http://www.eletrobras.com.br/EM_Atualizacao_SIPOT/sipot.asp. Acessado em: 18/10/2013.

ELIAS M. **Estudos de inventário hidrelétrico da bacia hidrográfica do rio Cupari**. Brasília: ANEEL, 2010.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética.

FILHO B.P.M. **Inventário hidrelétrico dos rios Jequitinhonha e Araçuaí**. Brasília: ANEEL, 2009.

GOMES K. **Inventário hidrelétrico do rio Sararé**. Brasília: ANEEL, 2011.

GOMES, Kaioá. **Estudo de Inventário Hidroelétrico do Rio Sararé**. Brasília: ANEEL, 2007.

JUNIOR D.N.T. **A operação do SIN e os procedimentos de rede do ONS**. Brasília: ESAF, 2008.

JUNIOR R.M. **O papel das energias renováveis no PDE**. São Paulo: Encontro Nacional de Operadores e Investidores em PCH, 2009.

KELMAN, Jerson. **Energia Firme de Sistemas Hidrelétricos e usos Múltiplos dos Recursos Hídricos**. Brasília, DF. 2011.

KONO, Y. **Utilização de rede neural LVQ para previsão do nível do rio Paraguai**. São José dos Campos: INPE (2008).

LEITE, A. D. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LUCAS, E. W. M.; SOUZA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; LUCIO, P. S. **Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.3, 308-322, 2009.

MARTINS, A.R.S. **Análise Qualitativa e Balanço dos Estudos de Inventário, Estudos de Viabilidade e de Garantia Física de PCHs em Tramitação na ANEEL.** São Paulo, VI Conferência de PCH, 2010.

MME - Ministério de Minas e Energia.

MUNHOZ, F. C. **Oferta de energia.** Brasília: ESAF, 2008.

NASCIMENTO, J.G. A. **Geração hidrelétrica.** Brasília: ESAF, 2008.

NAZARENO, J.S. **Planejamento da operação energética.** Brasília: ESAF, 2008.

OTSUKI, R. G.; REIS JUNIOR, D. S. **Análise Comparativa de Metodologias de Estimativa de Séries de Vazões Médias Mensais Aplicadas a Estudos Energéticos de Aproveitamentos Hidrelétricos,** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, AL, 2011.

PIGATTO, R. **Qual o potencial hídrico inexplorado e existente nas bacias brasileiras.** São Paulo: Encontro Nacional de Operadores e Investidores em PCH, 2010.

PINTO A. **Estudos de inventário hidrelétrico do rio Formoso.** Brasília: ANEEL, 2007.

PINTO A. **Estudos de inventário hidrelétrico do rio Negro.** Brasília: ANEEL, 2010.

RAFFAELLI M. **Inventário do ribeirão Santa Cruz.** Brasília: ANEEL, 2010.

SACCHI, R.; OZTURK, M. C.; PRINCIPEL, J. C.; CARNEIRO, A. A. F. M.; SILVA, I. N. **Water Inflow Forecasting Using the Echo State Network: a Brazilian Case Study.** IEEE Proceedings of International Joint Conference on Neural Network, Orlando FL, USA, 2007.

SANTANA, E. **Experiência de regulação no setor elétrico brasileiro.** Brasília: ANEEL, 2009.

SIQUEIRA, H. V. **Previsão de séries de vazões com redes neurais neurais artificiais e modelos lineares ajustados por algoritmos bio-inspirados.** Campinas: UNICAMP, 2009.

SILVA, C.V. **Perspectivas de expansão do setor elétrico brasileiro.** Brasília: ANEEL, 2010.

SILVA, I. N. d.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas.** Curso Prático, São Paulo: Artliber, 2010.

SOUZA, A. P. **Principais aspectos e regulação ambiental.** São Paulo: Encontro Nacional de Operadores e Investidores em PCH, 2009.

SOUZA, Z. et al. **Centrais hidrelétricas estudos para implantação.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1999.

SIMABUKU, R.T. **Visão geral da regulação da geração.** Brasília: ESAF, 2008.

TESSARO, C. **Portaria MME 463/2009: Novos desafios e oportunidades na Otimização da Viabilidade de projetos de PCH's.** São Paulo: Encontro Nacional de Operadores e Investidores em PCH, 2010.

TOLMASQUIM, M.T. **Expansão da oferta de energia elétrica e o papel das PCHs.** São Paulo: Encontro Nacional de Operadores e Investidores em PCH, 2009.

TOLMASQUIM, M.T. **Planejamento energético no Brasil.** São Paulo: Encontro Nacional de Operadores e Investidores em PCH, 2009.

TUCCI, C. E. **Hidrologia- ciência e aplicação.** Porto Alegre: UFRGS,1997.

ZIMMERMANN, M. P. **Organização e ações do MME.** Brasília: ESAF, 2008.