

2

Modelagem Hidrológica

2.1

Introdução

A Hidrologia é uma ciência multidisciplinar que lida com a ocorrência, circulação e distribuição das águas na Terra, suas propriedades físicas e químicas, e sua interação com o meio ambiente. Devido à natureza complexa do ciclo hidrológico e da sua relação com o clima, tipos de solo, topografia e geologia, a Hidrologia tem grande interseção com ciências que fazem parte da Geografia Física, como Meteorologia, Geologia e Oceanografia.

A importância do seu estudo é justificada pela quantidade de água ($1,4 \times 10^{18} \text{ m}^3$) distribuída pelos diversos ecossistemas terrestres:

- Oceanos	$1.350 \times 10^{15} \text{ m}^3$;
- Geleiras	$25 \times 10^{15} \text{ m}^3$;
- Águas subterrâneas	$8,4 \times 10^{15} \text{ m}^3$;
- Rios e lagos	$0,2 \times 10^{15} \text{ m}^3$;
- Biosfera	$6 \times 10^{11} \text{ m}^3$;
- Atmosfera	$0,013 \times 10^{15} \text{ m}^3$.

Segundo Tucci [26], a Hidrologia evoluiu de uma ciência preponderantemente descritiva e qualitativa para uma área de conhecimento na qual métodos quantitativos têm sido explorados, por meio de metodologias matemáticas e estatísticas, melhorando de um lado os resultados e de outro explorando melhor as informações existentes.

Os modelos matemáticos hidrológicos se desenvolveram de forma significativa nos últimos 50 anos, e esta evolução está estreitamente ligada ao uso dos computadores, a partir da década de 50.

O projeto de aproveitamentos de recursos hídricos, drenagem de cidades e rodovias e controle de enchentes exigiam a quantificação dos processos hidrológicos, fazendo com que os engenheiros desenvolvessem métodos quantitativos para explicar os processos hidrológicos inerentes aos projetos. A

grande preocupação até então, era a quantificação da transformação da chuva em vazão.

A partir dos anos 80, com a grande importância dada aos estudos sobre impacto ambiental, além da vazão, os modelos passaram a quantificar outras variáveis envolvidas nos processos relacionados com o escoamento.

De forma geral, a água que esco nos rios e lagos está diretamente interligada aos processos que ocorrem nas áreas das bacias (“watersheds”). A compreensão desses diversos processos é vital para que a modelagem hidrológica possa apoiar, de maneira eficaz, as diversas áreas que fazem uso da água ou necessitam de informações referentes ao seu ciclo hidrológico. O quadro seguinte esclarece essa idéia [26].

Tabela 2.1: Relação entre as diversas áreas apoiadas pela modelagem hidrológica e respectivos modelos

Área	Foco	Principais modelos
Desenvolvimento urbano	<i>Abastecimento de água</i> : regularização, adução, tratamento e distribuição	Precipitação-vazão; balanço de reservatório; modelo Hidráulico da rede de condutos
	<i>Tratamento de esgoto</i> : rede de coleta, tratamento, despejo do afluente, impacto ambiental do afluente em rios, lagos, reservatórios e oceanos	Hidráulica da rede coletora; qualidade da água de rios, reservatórios, lagos e estuários
	<i>Drenagem urbana e controle de cheias</i> : redes pluviais, obras hidráulicas e previsão de enchentes	Precipitação-vazão para dimensionamento e previsão de cheias; amortecimento em reservatório; remanso de rios e canais; qualidade da água de redes pluviais
Energia	<i>Projeto e operação de hidrelétricas</i> : disponibilidade hídrica, regularização para energia firme, projeto de vertedores, diques, condutos, previsão de afluência de vazões e operação hidráulica dos reservatórios em tempo real	Precipitação-vazão para extensão de série temporal e previsão em tempo real para operação do sistema ; balanço de reservatórios; hidráulico de rios e canais; modelo de dispositivos hidráulicos
Transporte	<i>Navegação</i> : canal de navegação; barragem e eclusa; manutenção dos sistemas; níveis e calados; portos	Precipitação-vazão para estimar a vazão; modelos de rios para estimativa do calado e de operação de barragem
Controle de calamidades	<i>Rompimento de barragens</i> : eventos críticos <i>Cheias</i> : alerta da população ribeirinha <i>Estiagens</i> : racionamento para abastecimento urbano e irrigação	Modelos hidráulicos de rompimentos de barragens; modelos precipitação-vazão e vazão-vazão em tempo real para estiagens e cheias
Gerenciamento de recursos hídricos	<i>Concessão do uso da água</i> <i>Controle do uso e conservação da água</i>	Modelos precipitação-vazão; regionalização de variáveis hidrológicas; modelos de balanço e escoamento em rios
Sistema de informações	<i>Cadastro de usuários</i>	Modelos hidrológicos para

Área	Foco	Principais modelos
	<i>Monitoramento de variáveis hidrológicas</i>	preenchimento de falhas; precipitação-vazão; estatísticos
Produção agrícola	<i>Irrigação</i> : disponibilidade hídrica, regularização, necessidade hídrica agrícola e distribuição	Precipitação-vazão; balanço de reservatório; balanço agrícola; projeto e otimização de rede de canais
Controle ambiental	<i>Impacto de obras hidráulicas</i> : reservatórios, diques e polders <i>Impacto devido a despejo de afluentes</i> : efluentes industriais e domésticos <i>Impacto devido a uso do solo rural e urbano</i> : erosão do solo, impermeabilidade e rede de condutos	Modelos hidráulicos e de qualidade da água de rios, reservatórios e de cargas difusas; hidráulicos e de qualidade de água de lagos e estuários; precipitação-vazão, erosão e transporte hídrico

2.2

Histórico

Os primeiros estudos hidrológicos de que se tem registro tinham objetivos bastante práticos [27]. Há 4000 anos, foi instalado, no Rio Nilo, um “nilômetro” (escala para leitura do nível do Rio Nilo), ao qual apenas sacerdotes tinham acesso. A taxa de imposto a ser cobrada, durante o ano, era proporcional ao nível de água do rio. A primeira referência à medição de chuva data de cerca de 2.000 anos, na Índia. Neste caso o total precipitado no ano também servia como base para cálculo de impostos.

Em relação à modelagem hidrológica, propriamente dita, ela vem caminhando, segundo Todini [28], desde o Método Racional [29] – no qual se calcula a vazão por meio do produto do coeficiente de escoamento superficial, intensidade pluviométrica e área de drenagem – até os recentes modelos físico-distribuídos (Apêndice 1) [30-32]. De fato, os grandes avanços começaram a partir de 1930, quando agências governamentais de países desenvolvidos começaram a desenvolver seus próprios programas de pesquisas hidrológicas. Os modelos desenvolvidos nessas pesquisas tratavam de descrever os processos de cada componente do ciclo hidrológico. Em 1932, Sherman [33] desenvolveu o Hidrograma Unitário. Em 1933, Horton [34] desenvolveu a teoria da infiltração,

cujos modelos, a não ser para microbacias do semi-árido com solos rasos e desprovidos de vegetação, não funciona bem para a quantificação do escoamento direto em microbacias de clima úmido. Em 1939, MacCarthy desenvolveu um modelo de escoamento em rios [35], baseando-se no modelo Muskingum e Puls para o escoamento em reservatório.

Somente na década de 50, em função da disponibilidade do computador e do aprimoramento de técnicas numéricas e estatísticas, houve um desenvolvimento acelerado de modelos semi-conceituais (alguns autores dizem conceituais - Apêndice 1) de transformação precipitação-vazão como os modelos SSARR [36]. Estes modelos representam os principais processos desta parte (entre precipitação e a vazão) do ciclo hidrológico, utilizando funções empíricas e a equação da continuidade para cada uma das partes. Vários modelos foram propostos a seguir, se diferenciando no maior ou menor detalhamento de partes do ciclo hidrológico ou nas propostas de novas equações empíricas.

Os modelos semi-conceituais têm sido muito utilizados na prática de engenharia para resolução de diversos problemas, como balanço hídrico, extensão de séries, vazão de projeto a partir da precipitação, previsão em tempo real e impacto de modificação do uso do solo. Geralmente, os resultados obtidos por eles atendem a grande parte dos problemas existentes. No entanto, a implementação e calibração de tais modelos podem tipicamente apresentar várias dificuldades [37], requerendo sofisticadas ferramentas matemáticas [38], significativo número de dados de calibração [39] e um certo grau de expertise e experiência no uso do modelo por parte do usuário [40].

Em paralelo com os modelos semi-conceituais, desenvolveram-se os modelos empíricos (Apêndice 1). Os primeiros modelos empíricos eram gráficos, como o método coaxial [41]. O ajuste do hidrograma unitário por mínimos quadrados [42] é um exemplo de metodologia ainda muito utilizada. Várias técnicas foram utilizadas para se determinar o hidrograma unitário por métodos empíricos: série de Fourier, transformadas de Laplace, polinômios de Laguerre, uso de séries temporais [43]. Apesar do grande sucesso dos modelos empíricos na previsão em tempo real, o uso deste tipo de modelo apresenta algumas dificuldades como a determinação de seus parâmetros e as incertezas quanto a prognósticos fora da faixa de ajuste.

As décadas de 60 e 70 foram marcadas pela introdução de vários outros modelos que contribuíram com características singulares, dentre outros se destacando o Stanford IV [44] que introduziu a distribuição espacial da avaliação da infiltração, Dawdy e O'Donnell [45], HEC-1 (HEC, 1968) e Ibbit (1973) que introduziu a otimização dos parâmetros de um modelo hidrológico. Neste período foram apresentados vários outros modelos hidrológicos que, na realidade, eram combinações de outros algoritmos básicos, com relação aos modelos citados.

No final da década de 70, surgiram duas tendências:

- Como os modelos tinham muitos parâmetros, a primeira foi a utilização na modelagem hidrológica somente dos parâmetros dos processos mais importantes. Por meio dessa simplificação é possível obter resultados equivalentes aos dos modelos que representam quase todos os processos, devido à pequena sensibilidade dos demais parâmetros. Seguindo essa linha surgiram modelos com menor número de funções e parâmetros (IPH II [46] e SMAP [47]) e mais eficientes para a engenharia. Uma das aplicações que mais se beneficiou dessa simplificação foi a previsão em tempo real, que necessitava de parcimônia para melhorar a atualização dos parâmetros.

- Com o aumento da preocupação ambiental e a avaliação do impacto da alteração do uso do solo, iniciou-se o desenvolvimento de modelos com maior base física, procurando definir relações que pudessem ser estabelecidas entre as características físicas do sistema e os parâmetros, reduzindo, assim, o empirismo na estimativa desses parâmetros. Nessa linha, destacam-se modelos, tal como, na área de agricultura, com o objetivo de avaliação do escoamento, sedimentos e componentes de qualidade da água, o ANSWERS [48]. Em relação a modelos hidrológicos que retratavam apenas a transformação chuva-vazão com fundamentos hidrológicos físicos, destacam-se o Topmodel e o SHE [49]. Todos os cinco modelos – IPH II, SMAP, ANSWERS, Topmodel e SHE – são modelos físico-distribuídos, porque, geralmente, utilizam algum atributo espacial de discretização e introduzem expressões dinâmicas nos processos. Eles são distribuídos por módulos ou por unidade hidrológica, considerando com maior detalhe a variabilidade espacial das características da bacia e da precipitação. No entanto, eles não apresentam, necessariamente, melhor resultado que os modelos tradicionais. O benefício do seu uso é poder retratar processos distribuídos.

De forma geral, nas últimas décadas, os modelos hidrológicos se desenvolveram em dois sentidos: *modelos para pequenas bacias*, que buscam representar com maior precisão, e de forma distribuída, os processos hidrológicos; e *modelos para grandes bacias*, que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande magnitude. Esta visão está relacionada com a escala dos processos no sistema físico.

2.3

Modelos Atualmente Usados no Mundo

No Brasil, os primeiros textos publicados em hidrologia são de Garcez [50] e Souza Pinto [51]. Em relação à modelagem hidrológica no Brasil, voltada para previsão de afluência de vazões e operação hidráulica dos reservatórios em tempo real, foram desenvolvidos vários modelos hidrológicos de previsão voltados para curto, médio e longo prazo. Entre eles pode-se citar os modelos estocásticos IPH, SMAP, PREVAZ, PREVIVAZM, PREVIVAZ e PREVIVAZH. Como já mencionado no capítulo 1, os modelos de previsão de vazão atualmente utilizados para todos os locais de aproveitamento, à exceção do aproveitamento de Sobradinho, na bacia do rio São Francisco, são os modelos estocásticos PREVIVAZ e PREVIVAZH, respectivamente, para previsão de vazões médias semanais e diárias.

A seguir, efetua-se uma breve explanação sobre alguns dos principais modelos usados em nosso país e no resto do mundo.

PREVAZ - para o horizonte de longo prazo, em base mensal, tradicionalmente era utilizado pela ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.), e posteriormente pelo ONS, o modelo PREVAZ baseado em modelagem estocástica de séries temporais, utiliza técnicas misturando as abordagens tradicionais com modelos auto-regressivos [5] e o método de Yevjevich de análise da estrutura periódica da série transformada [52]. No entanto, pelo fato do PREVAZ ser um modelo estocástico com base mensal. As previsões semanais eram obtidas indiretamente a partir da desagregação da vazão mensal. Sendo assim, a partir de maio de 1993, algumas empresas do setor elétrico iniciaram o processo de contratação, junto ao CEPEL, do desenvolvimento do modelo PREVIVAZ de previsão de vazões semanais [53].

PREVIVAZ e PREVIVAZM - O PREVIVAZ é um modelo de previsão de vazões médias semanais constituído por um conjunto de alternativas de metodologias para previsão de vazões para um horizonte de até seis semanas, para serem utilizadas no primeiro mês do planejamento de curto prazo (Programa Mensal de Operação - PMO e suas revisões semanais). Este modelo é, portanto, executado ao final de cada mês para a elaboração do PMO do mês seguinte e, durante o mês em curso, é executado todas as semanas para a realização das revisões do PMO.

Em dezembro de 1996, foi entregue a versão 1.1 do PREVIVAZ e, a partir deste momento, ele começou a ser utilizado e aperfeiçoado. Em janeiro de 1999, o modelo começou a ser utilizado pelo ONS na confecção do PMO. A partir de maio de 2000, optou-se em definitivo pela substituição do PREVAZ pelo PREVIVAZ nas previsões de vazões semanais.

Em relação às previsões mensais, como o programa PREVAZ funcionava num computador de grande porte na Eletrobrás e, a partir de agosto de 2001, passou a não funcionar, ficando sem manutenção, em 2002 o ONS contratou junto ao CEPEL o modelo PREVIVAZM, que é baseado na mesma metodologia do modelo PREVIVAZ.

O PREVIVAZM [54] tem como objetivo fornecer previsões mensais de aflúências a aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Hidroelétrico Brasileiro para um horizonte de até 12 meses, sendo uma ferramenta para estudos especiais de verificação de condições de atendimento da demanda energética no horizonte anual.

Nos modelos PREVIVAZ e PREVIVAZM adota-se uma abordagem bastante utilizada para obtenção de previsões de vazões fluviais, que consiste no uso do valor esperado de modelos de séries temporais. Neste caso, a previsão toma partido não só do comportamento sazonal das precipitações, como também considera o importante fenômeno denominado tendência hidrológica. A tendência hidrológica é o termo utilizado para se referir à tendência observada das séries históricas de vazões fluviais naturais, de valores superiores/inferiores ao valor normal do período serem seguidos e precedidos por valores também superiores/inferiores ao valor normal. Ou seja, se em uma certa semana (ou mês), a vazão do rio foi superior ao valor médio para aquela semana (ou mês), é provável que, na semana (ou mês) seguinte, a vazão do rio deverá continuar acima da média.

Da mesma forma, se na semana (ou mês), a vazão foi inferior à média da semana (ou mês), na semana (ou mês) seguinte, a vazão do rio deverá continuar abaixo da média.

A ocorrência de tendência hidrológica tem sido atribuída ao fenômeno da infiltração de parcela do volume precipitado sobre a bacia hidrográfica. A parcela do volume precipitado que infiltra depende de diversos fatores, dentre eles o estado de umidade da superfície do terreno. Assim, se a semana (ou mês) passada foi uma semana (ou mês) com bastante precipitação e, por exemplo, com vazões fluviais altas, esta semana (ou mês) tende a ser de vazões altas, pois a superfície do terreno deverá estar úmida e a infiltração será pequena, aumentando o escoamento direto. Além disto, a parcela que infiltrou na semana (ou mês) passada poderá estar chegando ao rio esta semana (ou mês).

Na terminologia de séries temporais, a tendência hidrológica é conhecida como estrutura de dependência temporal, sendo quantificada pela função de autocorrelação estimada do registro de vazões. Essencialmente, qualquer estrutura de dependência temporal sazonal pode ser reproduzida por modelos de séries temporais lineares do tipo PARMA (p, q), sendo este tipo de modelo uma abordagem bastante flexível, e bastante popular, para a modelagem estocástica de vazões fluviais [55]. O PREVIVAZ e o PREVIVAZM utilizam modelos lineares do tipo PARMA (p, q) [5], acoplados a diferentes pré-transformações das séries históricas, do tipo Box-Cox ou logarítmicas [6] e a diferentes formas de estimação de parâmetros dos modelos, para obtenção de previsões de vazões semanais e mensais, respectivamente.

Modelo PREVIVAZH – Segundo [4], o PREVIVAZH é um modelo de natureza estocástica, baseado na desagregação em intervalos diários das previsões semanais utilizadas na elaboração do PMO (em geral, obtidas pelo modelo PREVIVAZ). O modelo utiliza as previsões das aflúncias semanais e seqüências sintéticas de vazões diárias geradas pelo modelo DIANA [56], para os sete dias da semana. Neste caso, o modelo DIANA é alterado para condicionar a geração de seqüências às informações hidrológicas recentes, ou seja, às duas últimas aflúncias diárias observadas.

De forma bastante resumida, o processo de desagregação da previsão da aflúncia semanal VS_1 , em previsões para os sete dias da semana, pode assim ser descrito:

Consideram-se disponíveis a vazão semanal prevista para a semana que se inicia no dia $i=1$, VS_1 , e as duas últimas vazões diárias observadas, referentes aos dias $i = -1$ e $i = 0$, respectivamente VD_{-1} e VD_0 .

1º Passo: Com base no modelo DIANA, gera-se um conjunto de M seqüências sintéticas de sete vazões diárias, VD_i^m , $i = 1, \dots, 7$; $m = 1, \dots, M$.

2º Passo: Do conjunto de M seqüências, seleciona-se aquela cuja vazão média semanal seja a mais próxima à VS_1 para formar a previsão das vazões dos dias $i = 1, \dots, 7$.

Vale observar que a previsão semanal, VS_1 , é obtida a partir de valores médios de aflúências para semanas anteriores.

Modelo ETA – O modelo regional ETA [23] não é um modelo de previsão de vazão, mas sim um modelo que ajuda nesta previsão. Trata-se de um modelo atmosférico desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, sendo utilizado para simular a previsão do estado atmosférico. Foi instalado, em 1996, no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), onde é executado operacionalmente, desde então, com o objetivo de fornecer a previsão numérica de tempo em sua área de cobertura, que engloba a maior parte da América do Sul e oceanos adjacentes. O modelo ETA é utilizado para prever fenômenos em mesoescala, como aqueles associados à orografia, brisas marítimas e tempestades severas.

Dentre as variáveis meteorológicas previstas pelo modelo está a precipitação acumulada em 24 horas a cada dia. As previsões de precipitação são fornecidas em uma grade regular com resolução espacial de 40 km.

Modelo SMAP [26] – É utilizado por algumas companhias como, por exemplo, a TRACTBEL, que opera algumas usinas no Rio Uruguai, e pelo próprio ONS no trecho incremental entre a usina de Marimbondo e Água Vermelha. O modelo SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. De estrutura simples, este modelo é bem parecido com o SCS – que será apresentado adiante – diferenciando-se deste pelo fato que o SMAP é usado para simular séries contínuas e não apenas a cheia de projeto, como faz o SCS. Ele utiliza a separação do escoamento baseada nos parâmetros da US Soil Conservation e foi apresentado em 1982 por Lopes, Braga e Conejo [57], sendo inicialmente desenvolvido para intervalo de tempo

diário e posteriormente em versões horária e mensal, com algumas adaptações em sua estrutura.

As principais vantagens do modelo SMAP estão relacionadas a sua simplicidade e ao uso de pequeno número de parâmetros. Dos seis parâmetros do modelo, três são considerados fixos, com estimativas baseadas em processos físicos. Os três restantes são parâmetros calibráveis com base nas séries históricas de precipitação e vazão.

Os dados de entrada do modelo são os totais diários de chuva e o total diário de evaporação real. Segundo os autores, para sua calibração, são necessários de 30 a 90 dias de dados de vazão.

Modelos IPH [26] – Estes modelos foram desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e são aplicáveis a diferentes situações, recebendo uma numeração de acordo com a versão. Têm como característica positiva o reduzido número de parâmetros.

O modelo IPH II foi desenvolvido para ser usado em projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas. A propagação levada em conta nessa versão refere-se somente ao escoamento na superfície da bacia, não sendo utilizada para bacias onde seja importante a propagação no leito do rio. Este modelo baseia-se num algoritmo de separação de escoamento desenvolvido por Berthelot [58] que, por sua vez, utilizou a equação da continuidade em combinação com a equação de Horton e uma função empírica para a percolação. Em 1979, Tucci ampliou o algoritmo de infiltração e, mais tarde (1981), Tucci et al [46] utilizaram o referido algoritmo em conjunto com outros (perdas, escoamento superficial e subterrâneo) e implementaram o modelo visando a tornar o modelo aplicável em diferentes problemas de recursos hídricos. O IPH II conta com um reduzido número de parâmetros a ser estimado, sendo composto pelos seguintes algoritmos: perdas por evaporação e interceptação; separação dos escoamentos; propagação do escoamento superficial; propagação subterrânea; otimização dos parâmetros.

O modelo IPH III utiliza a versão anterior, para simular o escoamento na bacia, e propaga as vazões que chegam ao rio por meio do método da onda cinemática. Esta versão do modelo permite a simulação de um sistema fluvial, onde no canal não existam efeitos devido à maré ou lagos que provoquem remanso ou inversão de fluxo. Em resumo, o IPH III utiliza o método da onda cinemática ou o método de Muskingun-Cunge [26] para escoamento em canais e

utiliza o método de Pulz [26] para escoamento em reservatórios.

A versão IPH IV utiliza a versão II para a simulação do escoamento na bacia e um modelo hidrodinâmico para simular o escoamento no rio.

Há também uma versão chamada IPHMEN [26], que é um modelo que simula o processo precipitação-vazão com intervalo de tempo mensal. Foi proposto com objetivo de obter resultados rápidos em problemas básicos de balanço hídrico ou quando os dados diários não estão disponíveis. Sua principal limitação decorre da grande simplificação na variabilidade temporal. O IPHMEN tem três algoritmos básicos: de distribuição de volumes; de escoamento superficial e subterrâneo; e de otimização de parâmetros.

Modelo SSARR [26, 59] – Um dos primeiros modelos hidrológicos a surgir, utilizado principalmente para bacias grandes, o modelo SSARR – “Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation” – foi desenvolvido em 1966 pelo US Army Corps of Engineers. Tem sido usado com grande sucesso em várias partes do mundo, incluindo América do Norte, Central e América do Sul, Europa, Sudeste da Ásia e Índia, sob as mais diversas condições climáticas e em bacias variando de 5 a 444 Km². No Brasil, é utilizado por FURNAS para a previsão de vazão em todos os seus aproveitamentos. O modelo se baseia em três módulos principais: o módulo de precipitação-vazão em uma bacia; o módulo de escoamento em rios e reservatórios; e o módulo de regularização de reservatórios.

Como característica negativa, este modelo apresenta parâmetros que são de difícil ajuste para usuários sem experiência no uso do modelo. Além disso, apresenta grande número de parâmetros, apesar da formação simplista dos processos hidrológicos.

Modelo Stanford IV [26] – Foi apresentado por Crawford e Linsley [44], em 1966, e possui duas estruturas básicas: simulação na bacia – nesta estrutura existe um sub-módulo que considera o degelo – e rio e canal. Este modelo é tido como completo, pelo número de algoritmos e pelos diferentes componentes do ciclo hidrológico representados – interceptação e áreas impermeáveis; infiltração direta e retardada; evapotranspiração; escoamento superficial, sub-superficial, subterrâneo e no canal.

Como característica negativa, é de difícil uso para profissionais com pouca experiência, tendo em vista o número de parâmetros e detalhamentos empíricos. O Stanford IV tem sido aplicado em diferentes partes do mundo desde a década de

60, nas suas diferentes versões, atendendo a muitos projetos de engenharia.

Modelo SCS [26] – Apresentado, em 1975, pelo Soil Conservation Service, tem como foco a simulação de hidrogramas de cheias de projeto (vazão máxima) de obras hidráulicas, bem como o estabelecimento de risco de enchente para um determinado local. A sua utilização em todo o mundo se deve ao reduzido número de parâmetros e à relação entre os parâmetros e as características físicas da bacia. Originalmente preparado para simulação concentrada de uma bacia, o SCS pode ser utilizado em conjunto com um modelo de escoamento em rios e canais, para simular a propagação de hidrogramas de diferentes sub-bacias.

Estruturalmente, o modelo comporta três algoritmos: precipitação de projeto; determinação do volume superficial; e propagação do escoamento na bacia.

Modelo Topmodel – O modelo Topmodel [60] utiliza relações físicas para representar a bacia hidrográfica e os processos hidrológicos, com estrutura baseada na discretização em sub-bacias, mas utilizando fator topográfico obtido em mapas detalhados (discretização com valor máximo de malha de 50 m).

A estrutura do modelo é composta por: armazenamentos e fluxos nas zonas saturada e não-saturada; e propagação do fluxo na sub-bacia.

Modelo ANSWERS [26] – O modelo ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation) foi desenvolvido originalmente por Beasley e Huggins [48], em 1981, com o objetivo de simular os processos hidrológicos da quantidade de água e sedimentos, visando a estudar o comportamento de pequenas bacias rurais sujeitas ao uso agrícola.

Neste modelo, a bacia é discretizada segundo módulos quadrados, e em cada um é efetuado o balanço de volume vertical, onde são consideradas a precipitação, a interceptação, a infiltração e a evapotranspiração. A interação entre os módulos ocorre por meio do escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo entre módulos adjacentes.

Modelo Tank [59] – O “Tank Model” é um simples modelo não-linear que transforma precipitação em descarga, para previsão de descarga diária ou hidrogramas de cheias. Uma vez que os parâmetros tenham sido determinados, o uso do modelo torna-se bastante simples por meio do uso de tabelas ou, até mesmo, utilizando um simples desktop.

O Tank Model é composto por vários tanques – geralmente quatro tanques

para previsão de descargas diárias e três para previsão de cheias – dispostos verticalmente em série. Estima-se a descarga por meio das componentes de cada tanque, que correspondem às vazões de superfície, intermediária, sub-base e base.

O Tank Model é aplicado não somente nas bacias do Japão, como também em algumas bacias da Ásia, África, Europa e Estados Unidos, com bons resultados.

Modelo SRM [59] – O SRM (Snowmelt-Runoff Model) é um modelo físico projetado para simular e prever vazões diárias em bacias montanhosas, onde a vazão é em grande parte derivada do derretimento da neve. Além de ser um modelo simples, ele utiliza a nova tecnologia de sensoriamento remoto. O modelo tem sido testado em bacias montanhosas com clima desde úmido até semi-árido, com resultados satisfatórios.

Modelo HBV [59] – Este é um modelo computadorizado de captação, que converte precipitação, evaporação potencial, e neve derretida, quando for o caso, em vazão num canal ou reservatório, por meio da simulação de processos hidrológicos naturais. O HBV faz parte de um sistema computadorizado – o HBV/IHMS (Integrated Hydrological Modeling System) – voltado para previsão hidrológica, simulação de descarga, computação de cheias de projeto e estudos de mudança climática.

O modelo inclui rotinas voltadas para a contabilização da quantidade de neve acumulada, de neve derretida, da umidade do solo e das águas sub-superficiais, além de um modelo de escoamento (“routing procedure”) – ver Apêndice 1.

Os parâmetros mais importantes são estimados por meio de um procedimento de calibração, que geralmente requer de três a cinco anos de simultâneos registros meteorológicos e de vazões. Caso não haja registros de vazão disponíveis, os parâmetros podem ser, em alguns casos, estimados por meio das características físicas da bacia.

O HBV tem sido usado como modelo de previsão de vazões em tempo real desde 1977. É a ferramenta de previsão padrão na Suécia, onde em torno de 50 áreas de captação são monitoradas pelo Serviço Nacional de Alarme de Cheias. Previsões para companhias hidroelétricas são realizadas em 70 áreas de captação (aproveitamentos). Além disso, o HBV é utilizado em mais de 40 outros países do mundo.

Modelo Sacramento (contabilização da umidade do solo) [59] – Trata-se de um modelo precipitação-vazão conceitual de contabilização da umidade do solo. Representa a distribuição da umidade do solo através das diversas camadas do solo, requerendo como entrada séries temporais de precipitação e, opcionalmente, séries temporais de evapotranspiração e extensão de áreas cobertas pela neve.

O modelo tem sido usado em áreas úmidas, semi-áridas e áridas com bons resultados. É usado pelo National Weather Service (Estados Unidos) e é de complexa implementação.

Modelo SCLS (Synthesized Constrained Linear System) [59] – É uma síntese de modelos conceitual e “caixa-preta”, baseado no aproveitamento das características positivas de ambos. Pode ser usado na previsão do fluxo de rios e reservatórios. Estima a vazão total por meio da chuva e da evaporação, considerando a distribuição não-uniforme da umidade do solo sobre a bacia. Versões recentes podem resolver problemas de chuva-vazão com até dez fontes de fluxo a montante. No modelo, uma rotina autoregressiva pode ser usada para melhorar estimativas e atualizar os resultados para previsão em tempo real. O modelo tem sido usado com sucesso em regiões úmidas e semi-úmidas da China.

Sistema NWSRFS (National Weather Service River Forecast System) [61] – O NWSRFS é um modelo (sistema) hidrológico concentrado, físico, contínuo, de previsão hidrológica, implementado nos Estados Unidos. Contém uma gama de modelos hidrológicos: um simples modelo que calcula a vazão originada pelo derretimento da neve (“snowmelt model”), vários modelos precipitação-vazão, rotinas (modelos) para cálculo de escoamento (“routing models” ou “routing procedures”), e um modelo para simulação em reservatório. Contém, ainda, sistemas de apresentação e manuseio de dados.

Os modelos hidrológicos disponíveis no NWSRFC são:

Vazão originada pelo derretimento de neve

- HYDRO-17 Snow model;

Vazão originada pela precipitação (modelos precipitação-vazão)

- Modelo Sacramento (Sacramento Soil Moisture Accounting);

- Modelo Ohio RFC API;

- Middle Atlantic RFC API;

- Central Region RFC API;
- Colorado RFC API;
- Xinanjiang Soil Moisture Accounting;
- Continuous API Model;
- Middle Atlantic RFC API Model 2.

Modelos de escoamento

- Dynamic Wave Routing;
- Lag and K Routing;
- Layered Coefficient Routing;
- Muskingum Routing;
- Tatum Routing.

Modelo de simulação em reservatórios

Estruturalmente, o NWSRFS contém três sistemas maiores, que fazem uso dos modelos acima designados:

Sistema de calibração, que é usado para geração de séries temporais baseada no histórico de dados, e determinação dos parâmetros do modelo.

Sistema de previsão operacional (Operational Forecast System – OFS), que usa os parâmetros calibrados para: gerar previsões fluviais de curto prazo e previsões de cheias; e manutenção das variáveis de estado do modelo.

Módulo de previsão de vazões (Ensemble Streamflow Prediction – ESP), que usa os correntes estados do modelo, parâmetros calibrados e as séries históricas geradas para gerar previsões probabilísticas de semanas até meses à frente.

Fisicamente, há treze centros de previsão (RFCs – River Forecast Centers) espalhados pelos Estados Unidos, cada um responsável por uma determinada área. Tendo em vista a extensão do território americano, para a modelagem de cada região específica é usado um ou mais de um dentre os modelos hidrológicos (anteriormente, já designados) de que dispõe o sistema. Como produtos gerados por estes centros e por este sistema estão: previsão de cheias; previsão em rios, úteis para navegação; previsões de vazão de entrada de reservatórios; previsões de suprimento de água.

Em sua versão número cinco, o NWSRFS tem os seguintes requerimentos funcionais:

- permite uma variedade de modelos e rotinas;

- permite o usuário controlar a seleção de modelos e a seqüência de uso;
- processa, eficientemente, grande quantidade de dados, promovendo previsões em centenas de localidades em cada uma das treze áreas cobertas pelos RFC.

Além disso, pelo fato do sistema ser feito em módulos, novos modelos podem ser facilmente adicionados a sua estrutura, bem como se pode facilmente melhorar a estrutura dos módulos existentes.

2.4

Escolha do Modelo

Houve vários trabalhos de comparação entre os diferentes modelos, organizados por instituições como a WMO (World Meteorological Organization), que em 1975 comparou modelos conceituais de previsão de vazão, em 1986 tratou da comparação de modelos para geração de séries de vazões e neve, e em 1992 comparou modelos de previsão em tempo real.

Tendo em vista a grande variedade de modelos disponíveis, segundo Todini [28], a escolha do modelo mais apropriado, para um determinado caso específico, é uma difícil tarefa, particularmente quando cada modelador tende a promover os méritos de sua própria abordagem. Conclui-se, então, que, dentro dessa grande variedade, muitas vezes, o melhor modelo é aquele com o qual o modelador possui mais familiaridade.

Em termos de modelagem hidrológica voltada para previsão de vazão, que é o foco deste trabalho, embora modelos conceituais sejam importantes para o entendimento dos processos hidrológicos, há muitas situações práticas onde o principal objetivo é fazer previsões mais exatas em localidades específicas. Em tais situações, é preferível implementar um simples modelo “caixa-preta” para identificar um direto mapeamento entre entradas e saídas sem detalhada consideração da estrutura interna dos processos físicos envolvidos. Redes Neurais Artificiais é provavelmente a técnica de aprendizado de máquina (um tipo de modelo caixa-preta) de maior sucesso e com estrutura matemática flexível, capaz de identificar relações não-lineares complexas entre entrada e saída, sem a necessidade de entendimento dos fenômenos naturais [18].

Segundo [12], desde que haja relações não-lineares e incertezas entre muitos parâmetros numa modelagem de previsão de vazão, a calibração de modelos conceituais ou físicos é freqüentemente um procedimento complicado e que consome muito tempo. Uma boa alternativa, então, é o uso de um modelo heurístico do tipo caixa-preta, como por exemplo, um modelo baseado em Redes Neurais Artificiais, atualmente um dos mais populares métodos de inteligência artificial.

Segundo [7], os modelos baseados em regressão múltipla foram bastante utilizados para previsão de vazões até a chegada dos modelos auto-regressivos de médias móveis de Box e Jenkins [5] (ARMA, PARMA, etc.). Embora estes últimos sejam, até hoje, utilizados na modelagem de previsão de vazões, em muitos casos envolvendo esse tipo de modelagem tem havido uma preferência pela utilização de técnicas de inteligência computacional, com destaque para as redes neurais (modelos não-lineares). Isto ocorre, principalmente, em ocasiões onde os fenômenos envolvidos nos processos são notadamente não-lineares. Essa preferência é justificada tendo em vista os modelos auto-regressivos de médias móveis serem lineares.

É de senso comum, todavia, que nenhuma das metodologias de previsão de vazões existentes, até o momento, apresenta erros relativamente baixos, de maneira que órgãos, tais como o ONS, fiquem seguros no que tange às previsões, imprescindíveis para a programação e operação de grandes sistemas de distribuição de energia elétrica. Há sempre uma considerável incerteza ou risco.

A partir do capítulo seguinte, é feita uma síntese das principais metodologias que serão empregadas para a confecção de um modelo final que apresente menores erros quando da previsão de horizontes diários e semanais de vazão, tentando diminuir, assim, o sentimento de incerteza inerente à programação e operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica do país.