



EVIDENCIAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO E TÉCNICAS PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO DOS SISTEMAS HÍDRICOS

Allan Sarmento Vieira¹
Wilson Fadlo Curi²

RESUMO

Nas últimas décadas, novos modelos de simulação têm sido desenvolvidos e validados, para analisar e definir regras de operação para os sistemas de recursos hídricos. Mas apesar, na sua maioria, de serem bastante versáteis e difundidos na literatura, não conseguiam ainda incorporar características como as não linearidades dos processos hidráulicos e operacionais e o caráter multiobjetivo que considerem os aspectos qualitativos e quantitativos dos recursos hídricos numa mesma função objetivo. Assim, várias experiências têm sido realizadas através da utilização de técnicas de simulação, a fim de resolver estas simplificações e por serem mais apropriados, para avaliar alternativas de desempenho de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança. Para tanto, o presente trabalho, visa apresentar o estado da arte dos principais modelos de simulação e técnicas matemáticas que poderão ser utilizados, como base, no processo de tomada de decisão, no contexto dos recursos hídricos. Quanto aos procedimentos metodológicos, é do tipo descritivo e qualitativo, que na qual propôs uma exaustiva pesquisa bibliográfica que servirá de base para consulta para os gestores das bacias hidrográficas. Portanto este levantamento dos modelos de simulação e das técnicas matemáticas poderá auxiliar os gestores numa possível tomada de decisão de caráter multidisciplinar e servirá como instrumento, na definição das técnicas que ajudarão a delinear os Planos Diretores de Recursos Hídricos, e até mesmo dar apoio à implantação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, que visam garantir água em quantidade suficiente e qualidade adequada para as futuras gerações.

Palavras-chave: Recursos hídricos, modelos de simulação, aspectos qualitativo-quantitativo.

¹ Professor Doutor da Universidade Federal de Campina Grande.-PB. E-mail: allan.sarmento@ufcg.edu.br

² Professor Doutor da Universidade Federal de Campina Grande.-PB. E-mail: wfcuri@yahoo.com.br

1 INTRODUÇÃO

Diante da problemática mundial de escassez hídrica, é notória a necessidade de inserção de novas práticas e tecnologias no uso dos recursos hídricos que visem à otimização na condução e na eficiência dos sistemas de aplicação da água. Para tanto a falta de investimentos na infraestrutura das bacias hidrográficas comprometem o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis (MENDOZA et al., 2012).

Diante dessa situação, a adoção de um planejamento ótimo, com o uso de técnicas de simulação e otimização se fazem necessárias para utilizar água de forma eficiente, principalmente nos setores que consomem grandes volumes de água. Essas medidas se forem planejadas corretamente irão promover a modernização e a utilização racional da água, trabalhando com eficiência, sem prejudicar sua produção e nem causar impactos, de forma negativa, ao meio ambiente (PESSOA et al., 2016).

Para Assis e Vieira (2015) a água é um recurso natural essencial à vida, porém limitada devido à degradação ambiental atual e o crescimento das demandas dos diferentes usos múltiplos, que exige cada vez mais mecanismos que conduzam a uma utilização eficiente e racional deste bem.

Segundo Vieira (2011) com o aumento das demandas, devem-se analisar possíveis formas de gerenciamento, que somente serão possíveis via o uso de modelos matemáticos com concepções holísticas, utilizando técnicas de simulação e otimização dentro de uma visão sistêmica, que contemple os múltiplos interesses dos diferentes setores da sociedade. Deve-se, também, levar em consideração possíveis incertezas devido aos processos hidrológicos, tornando a representação matemática mais próxima da realidade. A crise da água, que hoje já é uma realidade na maioria das regiões e afeta os seus vários usos, pode agravar-se cada vez mais se não ocorrer um planejamento e gerenciamento visando à sustentabilidade.

Assim a simulação é técnica de modelagem que avalia o comportamento temporal de um sistema sob um conjunto de entradas e procedimentos operacionais especificados previamente. Esta ferramenta é, provavelmente, o método mais usado para análise de sistema de recursos hídricos graças a sua simplicidade (Celeste, 2006). De modo geral, pode-se dizer que os modelos de simulação são mais apropriados para análise do desempenho de alternativas operacionais de longo prazo, sendo bastante úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

segurança. Apesar de não gerarem diretamente uma solução ótima, podem revelar, uma solução pelo menos próxima da ótima, quando políticas alternativas são geradas por meio de numerosas aplicações do modelo.

Os modelos de otimização aplicam-se aos casos em que interessa saber qual é a alternativa operacional ótima do sistema e são aplicados, preferencialmente, para um pequeno intervalo de tempo (depende do número de equações necessárias para descrever cada estado e da discretização temporal utilizada). Estes modelos utilizam algoritmos para selecionar, sistematicamente, soluções ótimas, procurando satisfazer uma função objetivo e restrições operacionais. Não existe, porém, um procedimento de otimização que possa resolver eficientemente qualquer tipo de problema. A escolha do modelo de otimização vai depender da forma, quantidade e propriedades matemáticas da função objetivo e das restrições.

Existem inúmeros modelos de simulação e otimização e até mesmo uma combinação de ambas as técnicas, que são bastante difundidos na literatura, tal qual a utilização de técnicas de rede de fluxos, uma forma de programação linear usada em modelos mistos.

Apesar da maioria dos modelos, em especial os de simulações, serem bastantes versáteis e difundidos, não conseguiram, ainda, incorporar características como as não-linearidades dos processos hidráulicos e operacionais e o caráter multiobjetivo que considerem os aspectos qualitativos e quantitativos dos recursos hídricos numa mesma função objetivo. Simplificações estas foram incorporadas pelo modelo simulação quali-quantitativo e multiobjetivo proposto por Vieira (2011).

Segundo Albano (2004) alguns modelos matemáticos utilizados para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos genericamente têm como principal função objetivo o atendimento a determinadas demandas quantitativas de água, outros modelos têm como função-objetivo o atendimento as demandas qualitativas. No entanto, é raro a ocorrência de modelos matemáticos com função multiobjetivo que otimize e atenda restrições qualitativas e quantitativas de forma integrada. Em termos de modelos de simulação, os que existem na literatura são integrações de módulos, como o ACQUANET, HEC 5, entre outros.

Para Salla *et al.* (2014) com a crescente necessidade de um planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos adequado a nível de bacia hidrográfica, fizeram que os modelos de simulação fossem cada vez mais aprimorados, aumentando consequentemente a complexidade matemática. Com base neste contexto, o presente R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

trabalho, tem como objetivo principal, apresentar o estado da arte dos principais modelos de simulação e das técnicas que poderão ser utilizados no planejamento, no contexto dos recursos hídricos.

2.0 METODOLOGIA

Para atingir o objetivo da pesquisa descritos neste trabalho é necessário delinear os materiais e métodos que serão utilizados a fim de obter o estado da arte dos modelos de simulação e das técnicas utilizadas no planejamento dos recursos hídricos.

Assim quanto aos procedimentos técnicos e o tipo da pesquisa, foram utilizadas a documental e a exploratória. Foram manuseados periódicos, livros visando encontrar as definições, técnicas e a evolução dos modelos de simulação. De acordo com Silva Jr. *et al.* (2009), a pesquisa documental é um instrumento que aplica métodos e técnicas com o objetivo de executar, entender e verificar os mais variados tipos de documentos que não receberam ainda uma abordagem analítica. A pesquisa documental orientou-se na seguinte linha do tempo: definição do período, seleção de teses, revistas, artigos de eventos, descrição das técnicas matemáticas e dos modelos de simulação (SILVA & DYNNIKOV, 2014). A pesquisa exploratória segundo Prestes (2008) é frequentemente utilizada, pois adéqua maiores informações sobre o tema investigado, facilitando sua delimitação e o enfoque para o assunto, podendo inclusive avaliar e estabelecer critérios adotados, bem como métodos e técnicas adequados, para um trabalho satisfatório.

Com relação aos fins optou-se pelo método dedutivo. Esta opção se justifica, porque o método escolhido parte do geral para se chegar ao particular. O material documentado e coletado, bem como, as respectivas análises dos resultados foi estruturado focando o desenvolvimento do estado da arte. Gil (2008) destaca que o método dedutivo parte do geral para o particular. Assim, esse método parte de concepções tidas como verdadeiras e indiscutíveis, proporcionando chegar a conclusões exclusivamente formais.

Quanto à abordagem da pesquisa é qualitativa. De acordo com Beuren (2008), a pesquisa qualitativa apresenta uma análise mais profunda em relação aos fenômenos que estão sendo estudados, visando destacar características não verificadas através de um resultado de um estudo quantitativo.

Portanto, com base na necessidade de contribuir para a melhoria do planejamento dos recursos hídricos das bacias hidrográficas procurou-se reunir neste estudo, os principais modelos de simulação e técnicas utilizados no mundo e no Brasil, que culminou num estudo da arte que servirá de base na fundamentação de estudos detalhados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulação

A simulação tenta representar um sistema físico e prever seu comportamento sob um determinado conjunto de condições, não apresentando, praticamente, nenhuma exigência quanto à natureza do problema, a não ser a de que ele possa ser formulado matematicamente (Wurbs, 2005).

A maioria dos modelos de simulação, especialmente em casos de dimensionamento de obras hídricas, assume um dado conjunto de vazões históricas para representar a série histórica inteira. Na operação de reservatórios, as liberações são determinadas com base num conjunto pré-estabelecido de afluxos e regras (CELESTE, 2006). Dessa forma a simulação, tanto de processos simples ou mais complexos, não gera, diretamente, políticas ótimas de operação, mas, em compensação, pode permitir uma representação matemática bem mais detalhada e realista do sistema, devido as equações geradas para a determinação das variáveis num instante de tempo t , conhecendo-se seus valores no instante de tempo $t-1$. Por isso, possibilita ao tomador de decisão examinar o desempenho do sistema considerando várias entradas e regras de decisão, que podem ser modificadas até que os resultados se aproximem do ótimo.

Braga Jr. (1987) afirmava que existem dois tipos básicos de modelos de simulação em recursos hídricos. O primeiro diz respeito à simulação dos processos hidrológicos (exemplo: os de transformação de chuva em vazão) e de qualidade da água, onde equações diferenciais e relações empíricas são utilizadas para representação de vários aspectos quantitativos e qualitativos do ciclo hidrológico. O segundo tipo de modelo de simulação é referido aos aspectos de dimensionamento e

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

operação de sistemas de recursos hídricos. Modelos de simulação associados com a operação de reservatórios adotam, como regra geral, um cálculo de balanço hídrico entre as afluências, defluências e variações no armazenamento, podendo, ainda, incluir avaliações econômicas de prejuízos decorrentes de enchentes, benefícios de geração de energia hidrelétrica, benefícios de irrigação, pesca e outras características similares.

Segundo Barth (1987), a principal aplicação dos modelos de simulação em recursos hídricos tem sido na área do dimensionamento e operação de vários reservatórios. Notadamente quando se deseja levar em conta a aleatoriedade das seqüências de vazões afluentes e eventuais correlações cruzadas entre postos em uma bacia, o enfoque mais utilizado, na prática, tem sido a simulação.

De modo geral, pode-se dizer que modelos de simulação são mais apropriados para análise do desempenho de alternativas operacionais, principalmente, de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança. Apesar de não serem capazes de gerar diretamente uma solução ótima, pode revelar uma solução pelo menos próxima da ótima, ou seja, ideal (SANTOS, 2007).

3.2 Otimização

Os modelos de otimização são formulados para encontrar os valores de um conjunto de variáveis de decisão que otimizem (maximizem e minimizem) uma função objetivo sujeita a restrições. A função objetivo e as restrições são representadas por expressões matemáticas em função das variáveis de decisão.

Os modelos de otimização levam em consideração algum tipo de técnica de programação matemática e são classificados em: programação linear; programação dinâmica; programação não-linear e métodos heurísticos (algoritmos genéticos, redes neurais, lógica fuzzy, etc.).

Ros e Barros (2003) ressaltam que cada uma dessas técnicas pode ser resolvida de forma determinística ou estocástica, implícita ou explícita. A otimização determinística utiliza como variáveis de entrada, séries históricas, dados observados (as condições hidrológicas são perfeitamente conhecidas), a otimização estocástica implícita utiliza como variáveis de entrada séries geradas sinteticamente ou por métodos de previsão, ou seja, com base na série histórica, a otimização estocástica

explícita utiliza na formulação da otimização procedimentos estocásticos aplicados à série histórica original como variável de entrada (a otimização é realizada sem a presunção do perfeito conhecimento de eventos futuros).

3.2.1 Programação Linear

A programação linear é a técnica que mais se desenvolveu e uma das mais aplicadas em gerenciamento de recursos hídricos, além de ser considerada por alguns autores como um dos mais importantes avanços científicos da segunda metade do século XX (BARBOSA, 2002). As aplicações pioneiras da programação linear na área de recursos hídricos remontam à década de 1960, no contexto dos trabalhos do Harvard Water Resources Group, especificamente num problema de gerenciamento de água subterrânea. A primeira aplicação da programação linear em problemas de operação determinística de reservatório foi feita em 1962, sendo usada para um problema simplificado de um reservatório sem armazenamento plurianual (DORFMAN, citado por SIMONOVIC, 1992). As razões da grande utilização da programação linear, na área de recursos hídricos, estão na flexibilidade de sua adaptação a uma grande variedade de problemas, maior facilidade de entendimento, capacidade de enquadrar problemas de grande porte e disponibilidade de pacotes computacionais para pronta utilização, em nível comercial. Em contrapartida, a principal restrição da aplicação desta técnica é a exigência de linearidade das funções, o que não se verifica em muitos problemas de recursos hídricos (BARBOSA, 2002).

A programação linear é usada largamente em problemas de planejamento de atividades na agricultura, na indústria petrolífera, nos transportes, no setor financeiro, no setor hidroelétrico e na área de telecomunicações.

Righetto e Guimarães Filho (2003) apresentaram um estudo preliminar da operação dos reservatórios Cruzeta e Armando Ribeiro Gonçalves, RN, via programação linear, no sentido de verificar a magnitude de oferta hídrica destes reservatórios quando se dispõe de vazão firme proveniente de fonte exógena.

Curi *et al.* (2005) utilizaram a técnica de programação linear para a maximização da receita líquida sob condições de intermitências hídricas e econômicas em um perímetro irrigado no sertão da Paraíba, considerando, inclusive, o custo da água bruta na viabilidade da produção das culturas.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

Celeste (2006) analisou o planejamento e a operação de seis sistemas de reservatórios individualmente, pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Piancó na região Semiárida da Paraíba, utilizando técnicas de programação linear. A investigação tinha como objetivo o uso potencial dos recursos hídricos para irrigação, e com isso calcular indicadores que visem à sustentabilidade. Os resultados dos indicadores de desempenho das áreas potencialmente irrigadas pelos reservatórios apresentaram-se satisfatórios em relação aos valores ideais.

Schardong *et al.* (2009) apresentaram uma ferramenta desenvolvida no Excel, na qual possui um módulo em programação linear para análise dos sistemas complexos dos recursos hídricos. Para avaliar e testar o desempenho do algoritmo, o mesmo foi utilizado na solução de alocação das águas dos reservatórios o sistema Jacarecica-Ori que apresentou resultados satisfatórios.

Vieira *et al.* (2010) promoveram uma análise sistêmica do subsistema de reservatórios da bacia do Alto Piranhas no semiárido nordestino, através de técnicas de programação linear, e observaram que as alocações de água atenderam as demandas requeridas dos reservatórios estudados.

Barros (2010) otimizou, com técnicas de programação linear, os múltiplos usos em pequenos açudes na bacia de Sumé no estado da Paraíba. O objetivo principal do seu trabalho foi minimizar as perdas hídricas do sistema, maximizar o atendimento das demandas hídricas atuais e aumentar o uso destes recursos em outras atividades compatíveis com a cultura da região, como irrigação e piscicultura para melhorar o nível sócio-econômico da população da região, dando subsídios para uma tomada de decisão. Concluíram que águas dos pequenos açudes estavam sendo subutilizadas, já que foram observadas grandes perdas por evaporação e vertimento, que poderiam ser minimizadas com a implementação de políticas públicas que trariam melhores benefícios econômicos e sociais para região.

Nos sistemas de recursos hídricos é comum se ter processos descritos por expressões não lineares, o que limitaria a aplicabilidade de técnicas de programação linear. Uma forma de tratar esses tipos de problemas é através da linearização das funções não lineares, o que permite o uso de programação linear, em geral, na forma seqüencial. Para linearizar funções não lineares existem diferentes metodologias dentre as quais se destacam: programação sucessiva, programação linear separável, programação por aproximação linear.

3.2.2 Artíficos de Linearização

Programação linear separável

Um problema é dito de programação linear separável quando pode ser expresso como a soma de funções de variáveis simples. Logo, a linearização da função pode ser feita introduzindo pontos de grade, dividindo-a em trechos lineares. Esta técnica pode ser utilizada na linearização da curva área-volume, da vazão de descarga de fundo máxima e da vazão dos vertedouros de um determinado reservatório.

Programação linear seqüencial

Segundo Barbosa (2002), a programação linear seqüencial é uma outra forma para contornar o problema das não-linearidades, ou seja, adotar um processo iterativo até atingir a uma convergência desejada. Esse tipo de linearização pode ser realizado, através da determinação de coeficientes de retas, atualizados seqüencialmente a cada iteração, que são tangentes a um ponto ou secantes obtidas através do conhecimento de dois pontos da função. A escolha da linearização mais apropriada depende da busca ou manutenção da convexidade do problema de programação linear.

Programação por aproximações lineares

O Método de Programação por Aproximações, desenvolvido por Griffith e Stewart (1961) apud Cirilo (2002), fundamenta-se na expansão de funções em séries de Taylor e consiste em solucionar problemas de PNL por sucessivos sistemas lineares com aplicação da programação linear. Firmino (2007) aplicou esse método para o desenvolvimento do modelo META-F, destinado à otimização quali-quantitativa dos recursos hídricos em uma escala mensal.

Na estrutura de Programação por Aproximações, segundo Cirilo (2002), tem-se em cada iteração u :

$$f(X^u) - f(X^{u-1}) = \sum_{j=1}^{nj} \frac{\partial f(X^{u-1})}{\partial x_j} (X^u - X^{u-1}) \quad (01)$$

sujeito a

$$\begin{cases} \sum_{w=1}^{nj} \frac{\partial h_w(X^{u-1})}{\partial x_w} (X^u - X^{u-1}) = h_w(X^{u-1}) & w=1,2,\dots,m \\ \sum_{w=1}^{nj} \frac{\partial g_w(X^{u-1})}{\partial x_w} (X^u - X^{u-1}) \geq g_w(X^{u-1}) & w=m+1,\dots,mp \end{cases} \quad (02)$$

onde: x^u - é um vetor com nj variáveis de decisão na iteração u. $h_w(X)$ - é a w-ésima restrição de igualdade; $g_w(X)$ - é a w-ésima restrição de desigualdade.

A partir da estimativa do valor inicial, X_0 se obtém a solução do sistema linearizado. Repete-se o processo sucessivamente até atingir a convergência desejada. Para evitar que surjam soluções não viáveis do problema não linear original, restringe-se a variação entre sucessivas soluções lineares da forma

$$|X_j^u - X_j^{u-1}| \leq \delta_j \quad (03)$$

sendo: δ_j - o limite do passo de cálculo na iteração u, nas várias direções de busca, estabelecida para que a solução permaneça na região viável.

3.2.3 Programação Não Linear

A programação não linear não goza da mesma popularidade que a programação linear e a programação dinâmica têm na análise de sistemas de recursos hídricos. O fato é explicado em razão de que o processo de otimização requer maior tempo de processamento, quando comparado à programação linear, uma vez que a matemática envolvida nos modelos não lineares é muito mais complicada do que nos casos de programação linear (YEH, 1985).

O desenvolvimento crescente dos recursos computacionais, embora o artifício da linearização ainda seja bastante utilizado, vem facilitando a aplicação da programação não linear na prática de solução de problemas de sistemas de recursos R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

hídricos, mas ainda tem-se o problema de garantia de que a solução encontrada não seja a ótima global.

O modelo de otimização ORNAP (Optimal Reservoir Network Analysis Program), desenvolvido por Curi e Curi (2001), utiliza de técnicas de programação não linear com resolução mensal. O processo de otimização foi resolvido numericamente, através de programação não linear, contemplando uma função objetivo para a maximização da receita líquida anual advinda da agricultura irrigada, avaliando-se, também, o retorno financeiro da piscicultura extensiva nos reservatórios. Todos os requerimentos de ordem legal, sócio-econômicos e de sustentabilidade hídrica, além das restrições físicas e condições climáticas, foram considerados no modelo. Foi utilizado, acoplado a modelos de otimização de áreas irrigadas e usos de água para piscicultura, a geração de energia, o controle de cheias e o abastecimento urbano, com resultados bastante satisfatórios quando aplicado a esta classe de problemas.

Segundo Cirilo (2002), a programação não linear pode ser dividida quanto aos métodos utilizados na solução dos problemas em:

- Técnicas analíticas - as soluções ótimas são obtidas pela resolução das equações que representam um determinado sistema, utilizando os conceitos de derivadas, podendo a otimização ser reduzida à procura das raízes desses sistemas;
- Técnicas de busca numérica - são metodologias que utilizam informações passadas em um processo iterativo, com intuito de gerar melhores soluções no processo de otimização. Essa técnica de otimização permite ainda o emprego de métodos numéricos para resolver problemas dos quais não se conhece a solução analítica.

Para Labadie (2004), os algoritmos de programação não linear que são considerados, geralmente, como os mais poderosos e robustos são: (i) o método do gradiente reduzido generalizado; (ii) a programação quadrática sucessiva (ou método Lagrangeano projetado); (iii) o método Lagrangeano aumentado (ou método dos multiplicadores), e (iv) o método da programação sequencial. Nas pesquisas de Cirilo (2002) estão citados alguns programas como o ADS, da Universidade da Califórnia; o GAMS, da GAMS Development Corporation; o LANCELOT, o SOLVER do EXCEL, entre outros.

Andrade (2006) utilizou um algoritmo desenvolvido em programação não linear com intuito de maximizar a receita líquida anual advinda da agricultura irrigada e o retorno financeiro da piscicultura extensiva nos reservatórios da bacia do rio R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

Capibaribe. A metodologia adotada apresentou resultados satisfatórios que poderão subsidiar no processo de tomada de decisão na busca da eficiência do uso da água.

Rosal (2007) usou técnicas de programação não linear para otimizar redes pressurizadas de abastecimento de água. Os resultados demonstram que o algoritmo desenvolvido mostrou satisfatório, já que obedeceram todas as restrições.

Outras contribuições importantes sobre aplicação de técnicas de programação não linear em sistemas de reservatórios podem ser encontradas nos trabalhos de Yeh (1985), Simonovic (1992), Wurbs (1993), Labadie (2004) e Lima e Lanna (2005).

3.2.4 Programação Multiobjetivo

O tomador de decisão, em algumas situações, necessita considerar simultaneamente vários objetivos, que podem apresentar unidades de medidas heterogêneas. Este tipo de problema requer, na busca de sua solução, técnicas de programação multiobjetivo. Esta pode ser definida como um conjunto de procedimentos matemáticos destinados a buscar soluções ótimas para problemas com múltiplos objetivos ou metas a serem otimizados. Um método bastante utilizado para tratar de um problema multiobjetivo é o método das ponderações. Os objetivos, expressos pelas funções objetivo $f_1(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_n(x)$, são ponderados através de pesos, w_i , assim temos:

$$\max \text{ ou } \min = \sum_{i=1}^n w_i * f_i(x) \quad (04)$$

O método das ponderações permite avaliar um número maior de objetivos, mas é preciso definir, a priori, os coeficientes de ponderação.

Uma vantagem deste método é que os fatores de ponderação podem ser variados de forma paramétrica até que se obtenha o conjunto de soluções não dominadas (x^*). A melhor solução de compromisso terá um conjunto w_1, w_2, \dots, w_n que indica a importância relativa de cada objetivo.

3.2.5 Programação Dinâmica

Segundo Barros (1997) *apud* Vieira (2011), a programação dinâmica é uma técnica também usada para solucionar problemas em recursos hídricos, que podem ser vistos como processos de decisão seqüencial em vários estágios, não significando que “estágio” seja necessariamente um intervalo de tempo, mas pode representar atividades, localidades, etc., sendo melhor entendido como ponto do processo no qual uma decisão deve ser feita.

A vantagem da programação dinâmica é que ela pode ser utilizada num grande número de problemas de programação discreta, não necessitando de muita precisão numérica, podendo ser utilizada em alguns problemas de recursos hídricos.

A desvantagem marcante da programação dinâmica é a chamada praga da dimensionalidade que aparece quando há discretização elevada das variáveis de estado, quando a busca do ótimo em cada estágio exige enormes requerimentos de memória e de tempo de processamento (BELLMAN, citado por VIEIRA, 2011).

Lima e Lanna (2005) e Labadie (2004) apresentam diversos algoritmos de PD e suas aplicações em sistemas de recursos hídricos, dando ênfase aos problemas de operação de reservatórios.

Li *et al.* (2014) desenvolveram um algoritmo em programação dinâmica que permite otimizar um sistema de multi-reservatórios na China e os resultados demonstraram a eficiência e utilidade prática da metodologia proposta.

3.2.6 Modelos de Simulação Difundidos

A combinação de técnicas de simulação e otimização no desenvolvimento de modelos para sistemas de recursos hídricos, vem sendo difundida em programas computacionais e ganhou força, devido às grandes vantagens que podem ser extraídas desta integração.

Embora modelos, alguns deles têm como base o algoritmo em rede de fluxos sejam extremamente vantajosos em termos de eficiência computacional, eles apresentam algumas limitações (Roberto, 2002): Os algoritmos de rede de fluxo otimizam apenas sistemas lineares; A função objetivo é pré-definida e, portanto, não

pode ser livremente especificada pelo usuário; Estes algoritmos admitem, também, apenas os dois tipos de restrições: a conservação da massa nos nós e a limitação do fluxo nos arcos. A otimização é executada em cada intervalo de tempo, ou seja, não se garantem o ótimo global para um período de “n” intervalos de tempo.

A opção de não utilizar a técnica de rede de fluxo no modelo de simulação proposto foi devido o algoritmo Out-of-Kilter só representar cada componente como um sistema formado por uma rede de arcos e nós. Este processo limita a representatividade dos processos não-lineares vinculados a vários componentes dos reservatórios.

Pode-se, ainda, observar que existem vários modelos, que não são baseados em técnicas combinadas de otimização e simulação que podem ser utilizados na análise de sistemas de reservatórios. Dentre eles podemos citar: o modelo AQUARIUS, que utilizam técnicas de programação quadrática e o modelo CALSIM que trata alguns processos não-lineares de forma simplificada. Diaz *et al.* (2000) aplicou o modelo AQUARIUS para alocação de água bacia hidrográfica, onde realizou em seguida uma análise do sistema.

Não existe uma metodologia consagrada que possa ser utilizada para todas as configurações possíveis de um sistema, visto que estas diferem sob vários aspectos. A escolha de uma metodologia a ser aplicada depende de vários fatores, dentre os quais: a configuração do sistema, os objetivos de uso dos recursos hídricos e a eficiência computacional. Vale salientar que, na maioria dos casos, os modelos de suporte a decisão atuais são combinações de técnicas de otimização e simulação.

Outra tendência nos modelos de simulação é a incorporação do aspecto qualitativo da água. Alguns dos modelos observados na literatura são integrações de softwares de alocação e qualidade da água. As Tabelas a seguir mostram os principais modelos que usam técnicas combinadas de simulação e otimização com suas principais características e limitações.

Tabela 01 – Principais modelos de simulação e suas aplicações

MODELOS	ANO	ESCALA DE TEMPO			OPERAÇÕES DOS RESERVATÓRIOS		
		Mensal	Diária	Eventual	Níveis Metas	Zonas Múltiplas	Curvas Guias
HEC-3	1985	X	X	X		X	
HEC-5	1985	X	X	X		X	
HEC-ResSim	1991	X	X	X		X	
IRIS	1990	X	X				X
IRAS	1994	X	X				X
AQUATOOL	1996	X					X
WATERWARE	1996		X	X			X
QUAL2E	1970	X					
HEC-PRM	1991	X	X				X
AQUARIUS	2000	X					X
WEAP21	1988	X					X
MIKE BASIN	2005	X	X				X
RIVERWARE	1998	X	X	X	X		
MODSIM DDS	1984	X	X	X	X		X
ACQUANET	1986	X			X		
RIVERHELP	2007	X	X				X
CALSIM	2000	X			X		

Tabela 02 – Principais modelos de simulação e suas técnicas e linguagem de programação

MODELOS	TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO				SIG	LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO
	Linear	Não-linear	Dinâmica	Heurísticas		
HEC-3		X				FORTRAN
HEC-5		X				FORTRAN
HEC-ResSim		X				JAVA
IRIS		X				
IRAS		X				
AQUATOOL	X	X				C++
WATERWARE		X			X	JAVA
QUAL2E		X				FORTRAN
HEC-PRM		X				BASIC
AQUARIUS	X	X				C++
WEAP21	X	X				
MIKE BASIN	X	X			X	BASIC
RIVERWARE	X	X				C++
MODSIM DDS	X	X			X	C++
ACQUANET	X	X				BASIC
RIVERHELP	X	X			X	BASIC
CALSIM	X					JAVA

Tabela 03 – Principais modelos de simulação e suas características em relação às demandas e linearização

MODELOS	TIPO	DEMANDAS		PLANEJAMENTO AGRÍCOLA		ARTÍFICIOS DE LINEARIZAÇÃO
		consun-tivas	não-consun-tivas	Sim	Não	
HEC-3	MSO	X	X		X	
HEC-5	MSO	X	X		X	
HEC-ResSim	MSO	X	X		X	
IRIS	MSO	X	X		X	
IRAS	MSO	X	X		X	
AQUATOOL	MSO	X	X		X	X
WATERWARE	MSO	X	X		X	X
QUAL2E	MSO					
HEC-PRM	RF	X	X		X	X
AQUARIUS	SOM	X	X	X		
WEAP21	RF	X	X		X	X
MIKE BASIN	RF	X	X		X	X
RIVERWARE	MSO	X	X		X	X
MODSIM DDS	RF	X	X	X		X
ACQUANET	RF	X	X	X		X
RIVERHELP	RF	X	X		X	X
CALSIM	SOM	X	X		X	X

RF – Rede de fluxos; MSO – Uso de modelo de simulação e otimização; SOM – Simulação com otimização mensal.

Segundo Vieira (2011) a tendência atual é o uso combinado da simulação e otimização, utilizando técnicas em programação linear e que considere numa mesma função objetivo aspectos como: o atendimento as demandas quantitativas; atendimento aos níveis de concentrações; e as limitações físicas e operacionais dos componentes de sistema hídricos.

Tabela 04 – Principais modelos de simulação e suas características em relação aos processos hidrológicos e controles hidráulicos

MODELOS	Processos hidrológicos				Representação dos componentes dos reservatórios			
	E	P	I	Q	Vertedouro	Descarga de fundo	Tomada d' água	Comportas
HEC-3	X	X	X	X				
HEC-5	X	X	X	X			X	
HEC-ResSim	X	X	X	X				X
IRIS	X	X		X				
IRAS	X	X	X	X				
AQUATOOL	X	X	X	X				
WATERWARE	X	X	X	X				
QUAL2E				X				
HEC-PRM	X	X		X				
AQUARIUS	X	X		X	X			X
WEAP21	X	X	X	X				
MIKE BASIN	X	X	X	X				
RIVERWARE	X	X		X				
MODSIM DDS	X			X				
ACQUANET	X							
RIVERHELP	X	X	X	X				
CALSIM	X			X				

E – Evaporação; P – Precipitação; I – Infiltração e Q – Vazão Afluente.

Tabela 05 – Principais modelos de simulação e suas características em relação à qualidade de água

MODELOS	Módulo de Qualidade de Água						
	DBO	OD	FT	NT	CF	Eutrofização	Sedimentos
HEC-3							
HEC-5		X					
HEC-ResSim							
IRIS	X	X					
IRAS	X	X					
AQUATOOL							
WATERWARE	X	X					X
QUAL2E	X	X	X	X	X		
HEC-PRM							
AQUARIUS							
WEAP21							
MIKE BASIN	X	X					
RIVERWARE	X	X					X
MODSIM DDS	X	X					
ACQUANET	X	X					
RIVERHELP	X	X					
CALSIM							

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; OD – Oxigênio Dissolvido; NT – Nitrogênio Total; FT – Fósforo Total e CF – Coliformes Fecais.

Segundo S. Mohan *et al.* (1993), a Índia, na década de 90, operava os sistemas hídricos com aproximações convencionais com base em experiências. Assim foi proposto à simulação de quatro regras de operação padrão com modelo HEC-3,

considerando-se as demandas para o setor elétrico e para irrigação, para, em seguida, calcular a confiabilidade do sistema. Suiadee *et al.* (2007) propuseram a determinar regras de operação mensal para o reservatório de Nam Oon da Tailândia com um modelo desenvolvido com algoritmo genético, considerando um projeto de irrigação, e comparou com os resultados obtidos com aqueles obtidos pelo modelo HEC-3. Beard *et al.* (2007) analisou o desempenho dos reservatórios em Sacramento na bacia de San Joaquin no Estado da Califórnia, Estados Unidos, onde foram simuladas várias situações de cheias com o modelo HEC-3.

O'Neill *et al.* (1990) utilizaram o modelo de simulação HEC-5 para estabelecer estratégias de operação para um reservatório numa bacia hidrográfica nos Estados Unidos, com a finalidade de atender demandas industriais, urbanas e demanda ecológica do rio. Já Mousav *et al.* (2004) combinaram um modelo de otimização, que utiliza técnica de programação dinâmica, com o modelo de simulação HEC-5, visando o planejamento da operação ao longo prazo de um sistema de reservatórios de Karoon-Dez, no Irã, e observaram que o modelo HEC-5 apresentou resultados satisfatórios. Em respostas as inundações que ocorreram nos anos 1983, 1986, 1995 e 1997 no Estado Califórnia, Estados Unidos. Hickey *et al.* (2003) propuseram um estudo para avaliar as inundações e a redução da vazão no rio San Joaquin da bacia hidrográfica de Sacramento com o modelo HEC-5.

Nani *et al.* (2003) desenvolveram um trabalho utilizando o modelo HEC-ResSim, para recuperar níveis de água, nos pântanos, próximos dos rios Tigre e Eufrates, no Iraque, considerando a liberação de vazões, de um sistema de seis reservatórios, com o intuito de atender demandas como: a irrigação e energia elétrica, liberação de descarga e controle de cheias. Rivera *et al.* (2005) desenvolveram uma ferramenta para geração de vazões sintéticas que foram simuladas com o auxílio do HEC-ResSim com o intuito de prever possíveis inundações em tempo real, no sistema de reservatório de Addicks e de Barker em Houston, no Estado do Texas, Estados Unidos, determinando, assim, a probabilidade de ocorrer uma inundação. ADampitiyawatta *et al.* (2008) avaliaram regras de operação com modelo HEC-ResSim, para um sistema de reservatórios, que teve como objetivo a geração de energia elétrica, e, para isso, utilizou-se três cenários (seco, normal e úmido), com três horas de intervalos de tempo e verificaram que o modelo forneceu respostas esperadas para as regras simuladas.

Nandalal *et al.* (2003) fizeram referência ao modelo IRIS como uma ferramenta capaz de analisar e diagnosticar sistemas de recursos hídricos. Kim *et al.* (2000) R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

desenvolveram um modelo de otimização para fazer o planejamento de transferência de água entre bacias e referenciou alguns modelos, dentre eles o modelo de simulação IRIS, argumentando que não representam bem a realidade dos sistemas hídricos. Shnaydman (2004) propôs uma agregação de alguns modelos de simulação, dentre eles o modelo IRIS para construir regras de operação para sistemas complexos de recursos hídricos.

O modelo IRAS foi utilizado por Mauad (2000) num estudo em Alqueva, Portugal. Os resultados da simulação computacional forneceram a resiliência, confiabilidade e vulnerabilidade do sistema para os diversos usos da água. Brandão *et al.* (2000), utilizaram o modelo IRAS para caracterizar os usos futuros da água à jusante do rio Guadiana, que atenda às condições hidrológicas e os períodos de seca, de forma que sejam compatíveis com a sustentabilidade ecológica do rio. Peixoto (2004) aplicou o modelo IRAS para a Bacia do Rio Sapucaí-Mirim/Grande no Estado de São Paulo, Brasil.

Heinz *et al.* (2007) combinaram o módulo de otimização do AQUATOOL com indicadores econômicos e analisaram algumas de suas aplicações nos recursos hídricos da Europa. Andreu *et al.* (2007) propuseram uma metodologia que gerencia a água na bacia do Mediterrâneo em período de estiagem, definindo níveis de alertas a fim de aliviar as consequências da seca. Bruen (2002) referenciou o AQUATOOL como um sistema de apoio a decisão, utilizado para planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas complexas.

Freda (2004) utilizou o sistema WATERWARE para o gerenciamento das águas do litoral sul do Mediterrâneo visando à sustentabilidade da região. Fedra *et al.* (2005) utilizaram o modelo WATERWARE para simular e otimizar os recursos hídricos do litoral sul do Mediterrâneo a fim de minimizar os conflitos entre os usos como abastecimento, turismo, irrigação, considerando a contribuição da água subterrânea e a poluição e a infra-estrutura insuficiente. Fedra *et al.* (2007) utilizaram, novamente, o modelo WATERWARE para o gerenciamento dos recursos hídricos no sul do Mediterrâneo, levando em consideração uma análise multiobjetivo e multicriterial para avaliar o desempenho econômico da região.

Garcia (2001) estudou o comportamento do selênio proveniente da agricultura irrigada na Bacia do Rio Colorado nos Estados Unidos, estabelecendo regras de operação para agricultura irrigada a partir do modelo StateMOD. Parsons *et al.* (2006) utilizaram o modelo StateMOD para definir regras de operações que foram utilizadas na R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

prática levando em consideração os múltiplos usos da bacia do rio Colorado, em seguida avaliaram os benefícios gerados. Margane (2003) desenvolveu um projeto em conjunto com o Centro de Estudo Árabe e a Universidade de Hannover na Alemanha, com intuito de promover o gerenciamento, a proteção e sustentabilidade dos recursos naturais (água subterrânea e solo) e referenciou o modelo StateMOD para gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos superficiais.

Faber *et al.* (2007) propuseram a utilização integrada dos modelos HEC-PRM e HEC-ResSim para otimização multiobjetivo na parte superior dos reservatórios do Mississipi. Draper *et al.* (2003) e Jenkins *et al.* (2004) utilizaram e descreveram as técnicas de otimização do modelo HEC-PRM em estudos de sistema de recursos hídricos do estado da Califórnia.

Reca *et al.* (2001) desenvolveram um modelo de otimização para alocação de água para os sistemas de irrigação e referenciaram e usaram o modelo AQUARIUS. Roman (2005) referenciou e usou o modelo AQUARIUS na sistematização dos modelos de alocação de água.

Lévite *et al.* (2003) aplicaram o modelo para avaliação de alternativas de cenários para alocação de água na bacia do rio de Olifants, na África do Sul, e concluíram que o WEAP é um modelo amigável e útil para a avaliação rápida das decisões para alocação da água e para encontrar soluções para regiões da bacia onde os problemas de falta de água são prováveis de ocorrer. Ojekunle *et al.* (2007) aplicaram o modelo WEAP com vários cenários (seco, normal e úmido) no planejamento da água na bacia hidrográfica Hengshui da China. Fonseca *et al.* (2008) aplicaram o modelo WEAP na bacia dos rios Gramame, Mamuaba, Mumbaba e Marés, na Paraíba, para analisar os atendimentos as demandas hídricas da região.

O modelo MIKE BASIN 2000 foi utilizado por Dyrbak (2000) num estudo da operação de reservatórios na Polônia. Kjelds *et al.* (2001) descreveram alguns exemplos, utilizando o modelo MIKE BASIN 2000 no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Jha *et al.* (2003) aplicaram MIKE BASIN 2000 ao rio de Mun na Tailândia para avaliar o desempenho da bacia e recomendar práticas ótimas de alocação.

Zagona *et al.* (2001) referenciaram o modelo RIVERWARE para o planejamento e gerenciamento de sistemas complexos de recursos hídricos. Wheeler *et al.* (2002) aplicaram o modelo RIVERWARE na bacia do rio de Colorado nos Estados Unidos, para simular diversas políticas de gerência da água, incluindo reduções graduais da R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

água, a fim melhorar realocação entre as finalidades e retiradas. Carron *et al.* (2004) utilizaram o modelo RIVERWARE para definir várias políticas de operação, com intuito de determinar a vazão adequada a ser mantida no rio.

Triana e Labadie (2007) descrevem a nova versão do MODSIM DDS integrado a um banco de dados geo-referenciado ARCVIEW, dando a possibilidade de representar os dados num espectro espacial. Yancheva *et al.* (2006) utilizaram o modelo MODSIM DDS para simular do sistema de recursos hídricos na bacia Iskar na Bulgária tanto na escala de tempo mensal como a sazonal.

Vieira (2007) cita o modelo ACQUANET como um modelo que utiliza técnicas de rede de fluxos e apresenta suas limitações. Schardong (2006) descreve o modelo ACQUANET e apresenta uma ferramenta de otimização para análise de problemas de alocação de água em bacias hidrográficas utilizando técnicas de programação linear, integradas a um modelo de amortecimentos de ondas em canais. A ferramenta está sendo acoplada e incorporada ao ACQUANET. Albano (2004) propôs a integração do modelo ACQUANET com o modelo de qualidade de água (CE-QUAL-R1) para reservatórios e aplicou para o reservatório Jaguari-Jacareí no sistema Cantareira, no estado de São Paulo.

O ACQUANET possui um módulo que trata da qualidade das águas para rios, considerando lançamentos de efluentes pontuais de indústrias e cidades, podendo simular concentrações DBO, OD, Coliformes Totais, Fósforo Total, Algas, Nitrogênio Orgânico, Amônia, Nitrito e Nitrato. A variação das concentrações só é feita de forma espacial (ao longo do rio – variando-nos diversos arcos da rede de fluxo) e que a variação temporal está embutida através da utilização do módulo de alocação, que trabalha com a variação mensal de vazão. Essa alocação é determinada, utilizando algoritmo de otimização Out-of-Kilter mês a mês, para em seguida, de forma direta, simular a qualidade da água, somente em trechos dos rios (LABSID, 2004).

Ferreira *et al.* (2005) fizeram algumas reflexões sobre o modelo de simulação CALSIM II para definir políticas de operação para um sistema hídrico no estado da Califórnia nos Estados Unidos.

Vieira *et al.* (2007) utilizaram o modelo de simulação M-SIMISH na análise da eficiência da regra de operação integrada de reservatórios e perímetros irrigados no semi-árido brasileiro. Vieira *et al.* (2010) utilizaram o modelo de simulação M-SIMISH na determinação e análise de regras de operação ideais e integradas para subsistema de reservatórios da Bacia do Alto-Piranhas.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

Para Araújo (2005) a construção de modelos de qualidade de água contribuiu para o aprendizado, porque permitiu ao modelador expressar suas concepções e exercitar formas de pensamento, de modo a aprofundar o conhecimento do sistema e de seu comportamento.

Rodrigues (2007) desenvolveu um modelo que é a integração de outros modelos que faz uma análise quali-quantitativa simplificada, possibilitando o cálculo de cargas e vazões de diluição para o processo de outorga e cobrança pelo uso da água.

Boas (2008) propôs uma ferramenta que constitui na integração da modelagem de qualidade de água ao modelo MODECEL e depois aliou a um SIG (Sistema de Informações Geográficas), com o intuito de apoiar na tomada de decisão da gestão dos recursos hídricos.

Bárbara (2006) apresentou as principais limitações do modelo de simulação para qualidade de água QUAL-2E, dentre elas podemos citar: as simulações só podem ser realizadas em regime permanente, tanto em nível de quantidade quanto de parâmetros de qualidade da água; só permite a incorporação de até sete elementos de cabeceira e de até seis elementos de junção; o máximo de trechos possíveis de serem modelados é de 25; cada trecho pode ser dividido em, no máximo, vinte elementos computacionais, perfazendo o total de 250 elementos e o programa só permite até 25 elementos computacionais de descarga ou captação. Além disso, não se consegue fazer uma análise multiobjetivo, só serve para simular a qualidade das águas de rios e possui uma grande robustez na modelagem matemática e na requisição de dados para simulação.

Souza *et al*, (2000) apresentaram vários critérios para escolha de modelos matemáticos de qualidade de água para serem utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos. Escolheram dois modelos um mais simples (Streeter-Phelps) e outro mais complexo (QUAL-2E) e averiguaram que o modelo de Streeter-Phelps prevê com melhor aproximação os valores de DBO, em relação aos dados obtidos em campo.

O LABSID (2004) externou as inúmeras dificuldades na utilização dos modelos de qualidade de água já existentes, tal como o QUAL-2E e o OTIS, a partir de vários cenários idealizados. Foi observado que tais modelos não são podem ser integrados ao módulo de alocação do ACQUANET.

Silva (2007) efetuou uma modelagem matemática para qualidade de água, utilizando o modelo QUAL-2E, para investigar a redução da vazão do Rio Araguari em Minas Gerais, enfocando parâmetros, como: oxigênio dissolvido (OD), demanda R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

bioquímica de oxigênio (DBO), série nitrogenada, fósforo (orgânico e inorgânico), algas (clorofila a) e coliformes termotolerantes. Concluiu que, caso venha reduzir a vazão no trecho do rio, ocorrerá um aumento nas cargas poluidoras, comprometendo as atividades locais.

Bezerra *et al.* (2008) desenvolveram um modelo matemático no MATLAB utilizando o modelo de Streeter Phelps de autodepuração, onde foram incorporadas condições de contorno, sugeridas por Chapra, que propiciam: a simulação do perfil de OD e DBO5 considerando várias entradas de efluentes ao longo do curso d'água e a correção para condições de anaerobiose, condições estas que contribuem com o surgimento de concentrações negativas de OD e conduzem a previsões errôneas. Para testar o programa foram feitas várias simulações: uma para testar o método de calibração automática e outras duas para testar as condições de contorno. Em todos os casos, os resultados obtidos produziram bons desempenhos.

Larentis *et al.* (2008) avaliaram diversos cenários existentes na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas no Rio Grande do Sul, identificando e estimando os impactos das fontes difusas e pontuais de poluição, além dos efeitos de modificação do regime fluvial por obras hidráulicas. A referida avaliação se deu pela utilização de um modelo hidrológico e de qualidade da água que permitiram a simulação dos cenários de intervenção da bacia. Com a integração, o modelo IPH-MGBq permite, a partir de dados de precipitação, o cálculo e a representação da variabilidade temporal da vazão e da concentração de OD, DBO, nitrogênio e fósforo totais e coliformes fecais ao longo da rede de drenagem.

Nahon *et al.* (2009) desenvolveram um sistema de apoio à análise de outorga de lançamento de efluentes para a variável DBO. Esse sistema partiu da premissa de quatro problemas nacionais: crescente poluição dos corpos hídricos, falta de dados para conhecimento do comportamento do corpo receptor, equipe técnica reduzida nos órgãos outorgantes e falta de uma metodologia para análise de outorga de lançamento de efluentes. O sistema utilizou as equações do Modelo de Streeter-Phelps para fazer uma análise na Bacia do Alto Iguaçu, utilizando coeficientes conservadores para proteção dos corpos aquáticos e o Modelo QUAL-2E calibrado para esta bacia. O sistema testou quatro coeficientes e fez uma análise de erros em dados hidráulicos (velocidade média). Assim, pode-se dizer que este sistema pode auxiliar inicialmente, em ocasiões e locais com deficiência de dados para calibração de modelos, nos processos de outorga de lançamento de efluentes até que haja condições suficientes

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

(dados, equipe técnica, metodologia consolidada) para se utilizar novos modelos que representem melhor a qualidade das águas.

Vieira (2011) desenvolveu um modelo de simulação que consegue incorporar numa mesma função-objetivo aspectos quali-quantitativos e as não linearidades de processos físicos e operacionais em rios e reservatório, tornando o processo de decisão mais racional e menos intuitivo.

Viera & Curi (2013) utilizaram o modelo de simulação quali-quantitativa para fazer diagnóstico de dois reservatórios em série na bacia do Alto Piranhas no Estado da Paraíba, e modelo apresentou-se eficiente por otimizar todos os parâmetros mensais de qualidade da água e atendimento das requeridas restrições.

Observa-se que existem diversos modelos e inúmeras aplicações em diferentes bacias hidrográficas no Brasil e no mundo, mas, na sua maioria, nenhum deles não promovia numa mesma função objetivo, simultaneamente, a análise otimizada integrada dos aspectos quali-quantitativos (análise espacial e temporal dos volumes e concentrações) dos diferentes componentes do sistema num único módulo, inclusão das não linearidades dos componentes hidráulicos, análise de caráter multiobjetivo e serem totalmente desenvolvidos com técnicas de programação linear. Essas simplificações foram superadas após a proposta do modelo de simulação quali-quantitativo e multiobjetivo.

Huang (2014) afirma que os modelos numéricos de qualidade de água são desenvolvidos para prever o destino e o transporte dos contaminantes que chegam a reservatórios e lagos, e podem ser ferramentas úteis para a gestão dos recursos hídricos.

4 CONCLUSÃO

Portanto é notório que os modelos de simulação, multiobjetivos e que utilizam técnicas combinadas são de suma importância no processo de tomada de decisão no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, haja vista terem a capacidade de lidar com aspectos de caráter multidisciplinar e conseguir agregar um valor substancial de informações, permitindo analisar cenários complexos em relação aos aspectos quantitativos e qualitativos.

Assim, com a apresentação de vários modelos e das técnicas matemáticas, os gestores públicos e pesquisadores ficam à vontade para escolher o método mais adequado para os sistemas de recursos hídricos com o intuito de maximizar os benefícios oriundos dos processos decisórios, assim como minimizar os possíveis conflitos da sociedade moderna.

DISCLOSURE SIMULATION OF MODELS AND TECHNIQUES FOR PLANNING OF WATER SYSTEMS

ABSTRACT

In recent decades, new simulation models have been developed and validated to analyze and define operating rules for water resources systems. But despite mostly, they are quite versatile and widespread in the literature, could not incorporate features such as the nonlinearities of hydraulic and operational processes and multiobjective character to consider the qualitative and quantitative aspects of water resources in the same objective function. Thus, various experiments have been carried out by using simulation techniques, in order to solve these simplifications and to be more appropriate to evaluate alternatives for long-term performance and are useful for representing the system operation with a high degree of safety. Thus, the present work aims at presenting the state of the art of the main simulation models and mathematical techniques that can be used as a basis in the decision-making process in the context of water resources. Regarding methodological procedures is descriptive and qualitative, in which they proposed a comprehensive literature review as a basis for consultation to managers of watersheds. Therefore this survey of simulation models and mathematical techniques can assist managers in decision making possible multidisciplinary and will serve as a tool in establishing the techniques that will help to delineate the Master Plans for Water Resources, and even support the deployment the National System of water Resources Management, aimed at ensuring sufficient water and adequate quality for future generations.

Keywords: Water resources, simulation models, qualitative and quantitative aspects

REFERÊNCIAS

ALBANO, G. D., Integração de um modelo matemático de quantidade de água em rede de fluxo (ACQUANET) com um modelo matemático de qualidade de água em represas (CE-QUAL-R1) - estudo de caso: Represa Jaguari-Jacareí – Sistema Cantareira. São

Paulo, 230 p. *Dissertação (Mestrado)* - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2004.

ASSIS, L. F., VIEIRA, A. S.; Modelo de Cobrança Pelo Uso Da Água: Estimação e Análise da Arrecadação na Sub-Bacia Do Rio Do Peixe No Sertão Da Paraíba. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, – Brasília – DF, 2015.

ARAÚJO, S.C.S.; Modelos de Simulação baseados em Raciocínio Qualitativo para Avaliação da Qualidade da água em Bacias Hidrográficas. 2005. 218 f. *Tese (Doutorado em Ecologia)*. Universidade de Brasília. Instituto de Biologia. Departamento de Ecologia, Brasília 2005.

ANDREU, J.; M. A. PÉREZ; J. FERRER; A. VILLALOBOS AND J. PAREDES, Drought Management Decision Support System by Means of Risk Analysis Models; Book Methods and Tools for *Drought Analysis and Management-Chapter 10*; pp. 195-216; 2007.

ANDRADE, P. R. G. S.; Estudo para alocação ótima das águas de um sistema de reservatórios em série e em paralelo, para usos e objetivos múltiplos, na bacia do rio Capibaribe, PE, Campina Grande: UFCG – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, *Tese de Doutorado*. 227p. 2006.

ADAMPITIYAWATTA; SHENG-LIAN GUO (SHENG-LIAN GUO); LI WEI (WEI LI); Estudos para regulação de regras de operação com o modelo HEC-ResSim para sistema de reservatórios de Qingjiang; *Chinese Eletronic Periodical Services*; Vol. 34; pp. 15-17. <http://www.ceps.com.tw>, 2008.

AZEVEDO, C. A. V.; WALKER, W. R.; MERKLEY, G. P., Modelo de Ondas Cinemáticas na Solução do Problema Inverso da Irrigação por Sulco em Tempo Real. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.1, p.35-41. Campina Grande. 1997.

BARBOSA, P. S. F.; Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p. 97-163. 2002.

BÁRBARA, V. F., Uso do Modelo Qual2e no Estudo da Qualidade da Água e da Capacidade de Autodepuração do Rio Araguari – Ap (Amazônia). *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente* da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente. 2006.

BEZERRA; I. S. O; MENDONÇA; L. A. R; FRISCHKORN, H; Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose; *REM: R. Esc. Minas*, Ouro Preto, 61(2): 249-255, abr. jun. 2008.

BOAS, M. D. V., Modelo de Simulação de Sistemas Hídricos Complexos, Integrado com Avaliação de Qualidade da Água - Uma Ferramenta de Gestão para Apoio a

Decisão. XV, 183 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil). *Dissertação* - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2008.

BARROS, M. T. L. et. al., Optimization of large-scale hydropower system operations. *J. Water Resource Planning & Management*. An. Soc. Civ. Eng. Nova York, v.129, n. 3, p.178-188, mai/jun. (2003).

BRUEN, MICHAEL; Multiple Criteria And Decision Support Systems In *Water Resources Planning And River Basin Management*; Centre for Water Resources Research, Civil Engineering Department, University College Dublin, Ireland; p.11; National Hydrology Seminar; 2002.

BEARD, L. R., P.E., D.WRE, HON. M.; ASCE; The development of computer-based methods for hydrologic computations; *World Environmental & Water Resources Congress*; EWRI Annual Congress, May 15-20, 2007, Tampa, FL; 2007.

BEUREN I.M. Como Elaborar Trabalhos Monográficos em Contabilidade. Editora Atlas S.A. 3ª Edição. São Paulo, 2008

BRANDÃO, C.; RODRIGUES, R.; Hydrological Simulation of the International Catchment of Guadiana River. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 25, n.3, pp, 329-339 2000.

CARRON, J.; ZAGONA, E.; FULP, T.; Uncertainty Modeling in Riverware, Accepted for publication by the ASCE *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2004.

CELESTE, A. B.; Determinação e Análise de Indicadores de Desempenho e de Sustentabilidade de Seis Açudes na Bacia do Rio Piancó-PB e de Suas Potenciais Demandas. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 118p. *Dissertação de Mestrado*, 2006.

CIRILO, J. A., Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos. In: Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS-ABRH. Porto Alegre, p. 305-359. 2002.

CURI, W. F e CURI, R.C., CISDERGO – Cropping and Irrigation System Design with Reservoir and Groundwater Optimal Operation. In: Anais do XIV *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Aracaju. CD-ROM. 2001.

CURI, W. F.; CURI, R.C., ORNAP - Optimal Reservoir Network Analysis Program. In: Anais do XIV *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Aracaju. CD-ROM. 2001.

CURI, R. C.; CURI, W. F.; OLIVEIRA, M. B. A., Análise de Alterações na Receita Líquida de um Perímetro Irrigado no Semi-árido sob Condições de Variações Hídricas e Econômicas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. vol. 9, n. 3, p. 39-53. 2005.

DANTAS NETO, J., Modelos de Decisão para Otimização do Padrão de Cultivo, em Áreas Irrigadas, Baseados nas Funções de Resposta das Culturas à Água. Botucatu: UNESP. 125p. *Tese de Doutorado*. (1994).

DIAZ, G. E.; BROWN, T. C.; SVEINSSON, O. Aquarius: A Modeling System for River Basin Water Allocation. General Technical Report RM-GTR-299-revised, Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, *Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station*, 172 p. 2000.

DRAPER, A.J., M.W. JENKINS, K.W. KIRBY, J.R. LUND, AND HOWITT, R.E.; "Economic-Engineering Optimization for California Water Management," *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 129, No. 3, May/June 2003.

DYRBAK, L.; Reservoir operation optimization. *Dept of Hydrodynamics and Water Resources*, <http://www.dhissoftware.com/mikebasin/News/DyrbakReport.htm>; 2000.

FABER, B. A.; HAROU, J. J.; Multi-objective Optimization of Reservoir Systems Using HEC-ResPRM; World Environmental and Water Resources Congress 2007; *American Society of Civil Engineer*; pp. 1-14 2007.

FERREIRA, I. C.; TANAKA, S. K.; HOLLINSHEAD, S. P.; LUND, J. R.; Musings on a Model: CalSim II in California's Water Community; San Francisco Estuary and *Watershed Science*. Vol. 3, Issue 1 2005.

FEDRA, K., KUBAT, M., AND ZUVELA-ALOISE, M.; Water resources management: economic valuation and participatory multi-criteria optimization. Proceedings of the Second IASTED *International Conference Water Resources Management*, August 20-22, 2007.

FEDRA, K.; HARMANCIOGLU, N.; Water Resources Simulation and Optimization: a web based approach. *IASTED/SMO 2005*, Oranjestad, Aruba, August 2005.

FEDRA, K.; Water Resources Management in the Coastal Zone: Issues of Sustainability. In: Harmancioglu, N.B., Fisitikoglu, O., Dalkilic, Y, and Gul, A. [eds.]: *Water Resources Management: Risks and Challenges for the 21st Century*. Proceedings of the EWRA Symposium, September 2-4, 2004, Izmir, Turkey, Volume I, pp. 23-38; 2004.

FIRMINO, M. B. M., META-F: Um Modelo de Otimização Quali-Quantitativo para Operação de Sistemas de Recursos Hídricos e Poluição Fluvial. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 118p. *Dissertação de Mestrado*. 2007.

FONSECA, F.; Efeitos do turismo na demanda de água da bacia do rio Gramame - estudo de caso; Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. *Dissertação de Mestrado*. 2008.

GARCIA, L.; Managing Selenium in the Upper Colorado River Basin; Theme: Pollution Assessment and Prevention; *conferences national Water Quality Program*; The mission of CSREES is to advance knowledge for agriculture, the environment, human health and well being, and communities, 2001.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social/ Antônio Carlos Gil. - 6. ed. - São Paulo: Atlas, 2008.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

HEINZ, I. & M. PULIDO-VELAZQUEZ & J. R. LUND & J. ANDREU; Hydro-economic Modeling in River Basin Management: Implications and Applications for the European Water Framework Directive; *Journal Water Resources Management*; vol. 21; pp. 1103-1125; 2007.

HICKEY, J. T. , P.E.; MARCHIA V. BOND, THOMAS K. PATTON, KEVIN A. RICHARDSON, AND PAUL E. PUGNER, P.E.; Reservoir Simulations of Synthetic Rain Floods for the Sacramento and San Joaquin River Basins; *Journal Water Resources Planning and Management*. Vol. 129, Issue 6, pp. 443-457 ;2003.

HUANG, Y.; Multi-objective calibration of a reservoir water quality model in aggregation and non-dominated sorting approaches. *Journal of Hydrology*. Vol. 510. p. 280–292. (2014).

JHA, M. K. AND DAS GUPTA, A.; “Application of Mike Basin for water management strategies in a watershed.” *Water International*, 28(1), 27 - 35. 2003.

JENKINS, M.W., J.R. LUND, R.E. HOWITT, A.J. DRAPER, S.M. MSANGI, S.K. TANAKA, R.S. RITZEMA, AND MARQUES, G.F.; "Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights," *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 130, No. 4, July/August 2004.

KJELDS, J.; STORM, B.; Integrated Water Resources Modeling Water Use and Water Quality Simulation; *World Water Congress*, 2001.

KIM, SHEUNG-KOWN, JAEHEE KIM, AND YOUNGJOON PARK; Water Supply Planning with Inter-basin Water Transfer by an Optimization Model; “Working Paper, Department of Industrial Engineering, Korea University 2000.

KUCZERA, G., Fast Multi-Reservoir Multiperiod Linear Programming Models. *Water Resources Research*, v. 25, n. 2 p. 169-176. 1989.

LANNA, A.E., Nota de Aula: Cap. 5. Tópicos Avançados em PL: Método Simplex Revisado, Análise Pós-Ótimo e Artíficos de Linearização. Disciplina: Análise de Sistêmica de Recursos Hídricos. *Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da UFRGS*. p. 75-87. 1998.

LABSID-ACQUANET; Sistema de Suporte a Decisões Aplicado à Gestão e Planejamento de Recursos Hídricos; Relatório Final e Financiado pelo Cnpq; (2004).

LIMA, H. V. C., LANNA, A. E. L., Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.10, n. 3, p.5-22. 2005.

LIMA, H. V. C.; LANNA, A. E. L., Operação Ótima de Sistemas de Reservatórios: Aplicação ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza. In: *XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Aracaju. CD-ROM. 2001.

LABADIE, J. W., Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol 130(2), p. 93-111. 2004.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

LARENTIS, D. G.; Modelagem Matemática da Qualidade da Água em Grandes Bacias: Sistema Taquari-ANTAS-RS. *Dissertação (Mestrado)*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, p. 177. 2004.

LÉVITE, H., SALLY, H., AND COUR, J.; "Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model." *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, p.p. 779-786. 2003.

LI, X., WEI A, J., LI, T. WANGA, G. WILLIAM W. G. YEH; A parallel dynamic programming algorithm for multi-reservoir system Optimization; *Journal Advances in Water Resources*; Volume 67. P. 1–15. (2014).

MARTIN, Q., Optimal Reservoir Control for Hydropower on Colorado River, Texas. *Journal Water Resource Planning e Management*, v. 121, n. 6, p. 438-446. 1995.

MARGANE, A.; Project Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region. Arab Centre for the Study of Arid Zones and Dry Lands ACSAD Damascus and Federal Institute for *Geosciences and Natural Recourses* BGR Hannover, vol. 6; p. 23; 2003.

MOUSAVI, SEYED JAMSHID; ABBAS GHOLAMI ZANOOSI; AFSHAR ABBAS; Optimization and simulation of a multiple reservoir system operation; *Journal of water supply: research and technology*. ISSN 1606-9935; vol. 53, no6, pp. 409-424; 2004.

MAUAD, F. F.; Planejamento Integrado de Recursos Hidroenergéticos: O Confronto de Usos Múltiplos da Água no Aproveitamento Hidroelétrico de Alqueva em Portugal. *Tese de Doutorado*, 182 p., Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2000.

MENDOZA, C.J.C1, FRIZZONE, J.A. Economia de energia em irrigação por pivô central em função da melhoria na uniformidade da distribuição de água. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza v.6, n. 3, p.184–197, 2012.

NANI GOULD; FAUWAZ HANBALI; Army Engineers Develop Model to Support Iraqi Water Management, <http://www.wood.army.mil/engrmag/PDFs%20for%20Oct-ec%2004/Gould-Hanbali.pdf>, 2003.

NANDALAL, K. D. W.; SLOBODAN P. SIMONOVIC; State-Of-The-Art Report On Systems Analysis Methods For Resolution Of Conflicts In Water resources Management.; *A Report Prepared for Division of Water Sciences UNESCO*, 2003.

NAHON, I. M.; KISHI, R. T.; FERNANDES, C. V. S.; Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Análise de Outorga de Lançamento de Efluentes - Estudo de Caso: Bacia do Alto Iguaçu; *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 14 n.2 , 47-58, 2009.

O'NEILL, L. M.; IC; MCMAHON, TA; NATHAN, RJ; GRAZE, HR; Determining the Long-term Operating Policies of a Reservoir System Using the Computer Program HEC-5;

Agricultural Engineering Conference 1990: Preprints of Papers; pages: 261-265. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia; 1990.

OJEKUNLE, Z. O.; ZHAO, L.; LI, M.; YANG, Z.; TAN, X; Application of WEAP Simulation Model to Hengshui City Water Planning; *Transactions Of Tianjin University*; Vol.13 N° 2; p.p.142-146; 2007.

PARSONS, R; BENNETT, R; Reservoir Operations Management Using a Water Resources Model; *Operations Management 2006 Conference*; Darell Zimbelman, Werner C. Loehlein, Editors; Sacramento, California, USA; pp. 304-311; 2006.

PESSOA, M. F., ASSIS, L. F., VIEIRA, A. S.; Planejamento Ótimo da Água na Agricultura Irrigada: Um Estudo de Caso em Um Perímetro Paraibano. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. v. 7, n. 1 (2016).

PRESTES, M. L. M. A pesquisa e a construção do conhecimento científico: do planejamento aos textos, da escola à academia/ Maria Luci de Mesquita Prestes. – 3.ed., 1. Reimp. – São Paulo: Rêspel, 2008.

PEREIRA, Régis S., Identificação e Caracterização das Fontes de Poluição em Sistemas Hídricos. *ReRH – Revista Eletrônica de Recursos Hídrico*. Vol. 1 n.1 Jul/Set, p. 20-36. 2004a.

PORTO, R. L. L.; MÉLIO Jr, A. V.; ROBERTO, A. N.; PALOS, J. C., ACQUANET: Arquitetura, Estratégias e Ferramentas. *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. João Pessoa. Brasil. CD-ROM. 2005.

RECA, J. ; ROLDÁN, J.; ALCAIDE, M.; LÓPEZ, R.; CAMACHO, E.; Optimisation model for water allocation in deficit irrigation systems I. Description of the model; *Journal Agricultural Management Water*; vol. 48; p.p. 103-116; 2001.

RIGHETTO, A. M., FILHO, J. A. G., Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 8, n. 2 p. 19-29. 2003.

ROMAN, D. M. S; Systematization Of Water Allocation Systems: An Engineering Approach; *Dissertation submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University*; 2005.

RODRIGUES, R. B., ALOC – Modelo de alocação de carga e vazão de diluição visando subsidiar a gestão integrada dos recursos hídricos. *Anais I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico*, Taubaté, Brasil, 07-09 nov., IPABHi, p. 123-129. 2007.

RIVERA RAMIREZ; HECTOR DAVID; Flood control reservoir operations for conditions of limited storage capacity; *Texas A&M University*; <http://repository.tamu.edu/handle/1969.1/1464>; 2005.

ROBERTO, A. N.; Modelos de Rede de Fluxo Para Alocação da Água Entre Múltiplos Usos em uma Bacia Hidrográfica. *Dissertação de Mestrado*, 116 p., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2002.

ROSAL, M. C. F.; Programação Não-Linear Aplicado à Otimização de Redes Pressurizadas de Distribuição de Água. *Dissertação de Mestrado*, 97 p., Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Orientador Almir Cirilo. 2007.

ROS, D. A.; BARROS, M., Estratégias Operacionais de Sistemas Hidroenergéticos: Impactos de Diferentes Objetivos. In: *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Curitiba. CD-ROM. 2003.

SANTOS, V. S., Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 144p. *Dissertação de Mestrado*. 2007.

SIMONOVIC, S. P., Reservoir system analysis: closing gap between theory and practice. *Journal of Water Resources Planning and Management*, New York. vol. 118, nº 3, pp. 262 – 280. 1992.

SILVA, N. G. M.; Modelagem da Qualidade da Água no Trecho de Vazão Reduzida (Tvr) do Aproveitamento Hidrelétrico de Capim Branco I do Rio Araguari-Mg. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais*, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Orientador: Marcos von Sperling; 2007.

SCHARDONG, A.; Aplicação de técnicas de programação linear e extensões para otimização da alocação de água em sistemas de recursos hídricos, utilizando métodos de pontos interiores / A. Schardong. -- ed.rev. -- São Paulo, 141 p. *Dissertação (Mestrado)* - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2006.

S. MOHAN; U. SARAVANA KUMAR; Interstate multivalley multireservoir simulation: A case study; *International Journal of Water Resources Development*, Vol. 9, Issue 3 , p. 305 – 317, 1993.

SUIADEE, W.; TAWATCHAI TINGSANCHALI; A combined simulation-genetic algorithm optimization model for optimal rule curves of a reservoir: a case study of the Nam On Irrigation Project, Thailand; *Hydrological Processes* Vol. 21 Issue 23, P. 3211 – 3225, 2007.

SOUZA; S. N.; FLORENCIO, L.; Critérios para Escolha de Modelos Matemáticos como Ferramenta de Apoio ao Gerenciamento da Qualidade da Água de Bacias Hidrográficas; *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2000.

SHNAYDMAN, V. M.; The application of the aggregative approach in simulation modeling of water resources systems; *Journal Water Resources Management*; pp. 135-148; Vol. 6; 2004.

R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 233-266, abr./set. 2016.

SCHARDONG, A.; Aplicação de técnicas de programação linear e extensões para otimização da alocação de água em sistemas de recursos hídricos, utilizando métodos de pontos interiores / A. Schardong. -- ed.rev. -- São Paulo, 141 p. *Dissertação (Mestrado)* - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2006.

SALLA, M. R., ARQUIOLA, J. P., SOLERA, A., ÁLVAREZ, J. A., PEREIRA, C. E., ALAMY FILHO, J. E., OLIVEIRA, A. L. Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 189-204, 2014.

SILVA, J. R. S.; ALMEIDA, C. D.; GUINDANI, J. F. Pesquisa Documental: pistas teóricas e metodológicas. *Revista Brasileira de História & Ciências Sociais*, nº. 1, jun. 2009. Disponível em: www.rbhcs.com/index_arquivos/Artigo.Pesquisa%20documental.pdf. Acesso em: 10 maio. 2014.

SILVA, C. M. S.; DYNNIKOV, V. I.; Ideologia em problemas matemáticos nos livros didáticos soviéticos da pré-revolução até 1960. *Revista Brasileira de Educação*, vol.19 nº.56 Rio de Janeiro jan./mar. 2014

TRIANA, E. AND LABADIE, J. W.; Geo-Modsim: Spatial Decision Support System For River Basin Management; 2007 *ESRI International User Conference San Diego Convention Center San Diego, California June 18-22, 2007.*

TUCCI, CARLOS E. M.; Modelos Hidrológicos. – 2. ed. – Porto Alegre: *Livro*. Editora da UFRGS, 678p. 2005.

VIEIRA, A. S., Um Modelo de Simulação Via Programação Linear Sequencial, para Sistema de Recursos Hídricos. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 118p. *Dissertação de Mestrado*. 2007.

VIEIRA, A. S., Modelo de Simulação Quali-Quantitativo Multiobjetivo para o Planejamento Integrado dos Sistemas de Recursos Hídricos. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Recursos Naturais. 275p. *Tese de Doutorado*. 2011.

VIEIRA, A. S.; SILVA, V. S.; CURI, W. F. Avaliação dos Planejamentos Agrícolas para O Subsistema Catolé li E Poço Redondo No Semi-Árido Nordeste. *Revista Engenharia Ambiental: pesquisa e tecnologia*. Vol. 7 nº1, jan/mar, Espírito Santo do Pinhal, 2010.

VIEIRA, A. S.; SILVA, V. S.; CURI, W. F. Escolha das Regras de Operação Racional para Subsistema de Reservatórios no Semiárido Nordeste. *Revista Engenharia Ambiental: pesquisa e tecnologia*. Vol. 7 nº1, jan/mar, Espírito Santo do Pinhal, 2010.

VIEIRA, A. S.; CURI, W. F. Simulação quali-quantitativa da água de dois Reservatórios no semiárido paraibano - parte 2: Otimização quali-quantitativa. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves, 2013.

ZAGONA, E. A.; FULP, T. J.; SHANE, R.; MAGEE, T.; GORANFLO, H. M.; Riverware: A generalized tool for complex reservoir system modeling; *Journal of the American Water Resources Association*; vol. 37, no4, pp. 913-929; 2001.

WURBS, R. A., Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models. *Technical Report n° 282. Texas Water Resources Institute. 2005.*

WHEELER K., MAGEE, T. M., FULP, T. AND ZAGONA, E. A.; "Alternative policies in the Colorado River." Proceedings of the Natural Resources Law Center Allocating and Managing Water for a Sustainable Future: *Lessons from Around the World, Boulder, Colorado. 2005.*

YEH, W. W-G., Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water Resource. Washington, v. 2, n.12, p.1797-1818, 1985.*

YANCHEVA, S.; TEMELKOVA, M.; Application of MODSIM Software to the Operation of a Real Bulgarian Water Resources System; *Institute of Water Problems at Bulgarian Academy of Sciences Sofia, BULGARIA. 2006.*

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research, 18(1), pp. 14-20, 1982.*