

Um Modelo de Outorga para Bacias Controladas por Reservatórios: 1 - Desenvolvimento do Modelo que Contempla Demandas Múltiplas e Variáveis Mensalmente

Wilson Fadlo Curi; Alcigeimes Batista Celeste;
Rosires Catão Curi; Andréa Carla Lima Rodrigues

Centro de Tecnologia e Recursos Naturais CTRN – UFCG
wfcuri@yahoo.com.br, geimes@yahoo.com, rosirescuri@yahoo.com.br, acaralalima@yahoo.com.br

Recebido: 12/11/10 - revisado: 22/05/10 - aceito: 04/10/11

RESUMO

A outorga, um importante instrumento previsto na Lei 9.433./97 e em leis estaduais específicas, é de fundamental importância para o gerenciamento dos recursos hídricos, pois assegura os direitos de acesso e uso quantitativo e qualitativo da água. Vários métodos, principalmente aqueles baseados em vazão referencial, têm sido desenvolvidos, aprimorados e utilizados para a aplicação deste instrumento em bacias hidrográficas. Vazões regularizadas têm sido usadas como vazões referenciais no processo de outorga em bacias controladas por reservatórios. No entanto, para se obter maior eficiência na alocação quantitativa da água entre os usuários d'água em bacias controladas por reservatórios, com especial atenção à região semi-árida nordestina, os métodos apresentados na literatura não consideram, de forma simultânea, a variabilidade, a confiabilidade, a localização e a prioridade no atendimento das demandas hídricas e a sua disponibilidade e dinâmica hídrica espacial. Portanto, um modelo de otimização que contemplasse tais requerimentos num processo de outorga, baseado em programação linear, foi desenvolvido e apresentou resultados satisfatórios quando aplicado em uma bacia controlada por reservatórios.

Palavras-chave: Outorga, modelo, otimização, programação linear

INTRODUÇÃO

Um dos grandes entraves com relação ao processo de outorga de direito de uso de água é quantificar a vazão máxima a ser liberada para os usuários. Muitos estados brasileiros ainda não possuem legislação específica de outorga que estabeleça critérios para determinação dessa vazão e nos estados em que existe legislação, unanimemente, são utilizados os critérios baseados em vazões de referência tais como a $Q_{7,10}$ (média das vazões de sete dias consecutivos de estiagem com período de retorno de 10 anos), as Q_{85} , Q_{90} e Q_{95} (vazões com probabilidade de superação de 85%, 90% e 95%, respectivamente), e a Q_{R90} (vazão regularizada com 90% de garantia). Normalmente nesses critérios são estabelecidos percentuais da vazão de referência que serão disponibilizados para outorga.

Cruz e Tucci (2005) propuseram um modelo de simulação e otimização que considera o balanço hídrico em diferentes seções de uma bacia hidrográfica e a alocação de água se dá em termos da

prioridade de atendimento às demandas. As vazões disponibilizadas em cada seção tiveram como base a vazão de referência com 95% de permanência. Após a otimização da alocação da água, um modelo de simulação foi executado para verificação do atendimento.

Segundo Ribeiro (2000), o uso da vazão de referência aumenta a confiabilidade de atendimento, pois diminui a ocorrência de falhas. Porém, este procedimento limita o crescimento dos sistemas de uso da água já que, em grande parte do tempo, as vazões superam a vazão de referência.

Silva e Lanna (1997) analisaram critérios de outorga na bacia do Rio Branco – BA e concluíram que o critério de outorga, utilizando vazão de referência, adotado pelo Estado é insuficiente para atender todas as demandas da bacia.

Diante deste problema, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de minimizar as perdas geradas pela não utilização dos excedentes hídricos nos meses em que a vazão for superior à vazão de referência. Um estudo realizado por Câmara e Lanna (2002) na bacia do rio Gramame – PB estabeleceu dois valores diferenciados de vazão

máxima outorgável, um para o período chuvoso e outro para o período seco, levando em consideração as séries de vazões de cada período. Entretanto, de acordo com os autores, este critério, apesar de mostrar-se mais eficiente que o critério de uso de uma única vazão de referência, só pode ser utilizado em regiões com estações secas e chuvosas bem definidas, sendo necessária uma análise prévia da periodicidade das chuvas.

Outra alternativa, também analisada por Câmara e Lanna (2002) na bacia do rio Gramame – PB, foi a outorga baseada em valores de vazão referencial mensal. Igualmente ao critério anterior, este critério tem o objetivo de incrementar a vazão alocada aos usos da água, sendo, neste caso, a vazão de referência modificada para cada mês do ano e obtida através da curva de permanência mensal das séries de vazões naturais. Concluíram que o processo de outorga torna-se mais complexo e de difícil fiscalização; no entanto, não necessita de estações seca e chuvosa bem definidas para permitir um maior uso da disponibilidade hídrica.

Ribeiro e Lanna (2003) propuseram um modelo de outorga, baseado em vazões de referência máxima outorgável, para vazões de captação e diluição. Este modelo foi aplicado à bacia do rio Pirapama, PE.

Ainda com base na vazão de referência, Medeiros e Naghettini (2001) propuseram e avaliaram a utilização de um fator de correção anual para as vazões de referências com o intuito de aumentar a alocação de água nos chuvosos e, conseqüentemente, expandir as atividades dos usuários em anos com maiores ofertas hídricas. Porém, o método mostrou-se restrito a bacias com rede de estações fluviométricas densas que assegurem a determinação das vazões médias nos trechos de controle e sua aplicação em anos secos, caracterizados por situação de racionamento hídrico.

Além de modelos baseados em vazão de referência, outros utilizando quantidade de falhas pré-determinadas também têm sido estudados e apresentados na literatura. Dentro desta linha, destaca-se o trabalho proposto por Pereira (1996) que apresenta uma metodologia de critério de outorga com diversos níveis de prioridades relativas, através da qual os usos menos prioritários deverão cessar sempre que ocorrerem falhas de suprimento em usos de maior prioridade. Este método, ao invés de fixar uma vazão de referência, fixa a quantidade de falhas de atendimento para cada nível de prioridade. Neste caso, o usuário ao receber o direito de uso da água fica ciente do risco de não suprimento da sua demanda. Foi constatado que, apesar de necessitar de

um melhor aparelhamento do sistema de gerenciamento de recursos hídricos, o método apresenta a vantagem econômica e social de aumentar o uso da água disponível, ampliando o valor total da vazão outorgável.

Outro trabalho interessante ainda na linha de quantidade de falhas pré-determinadas foi proposto por Pereira e Lanna (1996). Neste caso estabeleceu-se que o abastecimento público e a vazão ecológica são os usos prioritários. A vazão excedente ao atendimento a essas demandas prioritárias é distribuída entre aquelas de prioridade inferior. Assim sendo, igualmente ao caso anterior, se ocorrerem falhas de atendimento, os usos menos prioritários serão primeiramente atingidos. Esse critério é conhecido como critério da vazão excedente. Porém, apesar de aumentar a vazão disponível para outorga, esse método tem a desvantagem de ter implementação complexa, pois necessita de um freqüente monitoramento quantitativo dos pontos de controle durante os períodos de escassez de água quando algumas outorgas estiverem suspensas.

Diante do exposto, observa-se atualmente na literatura duas linhas distintas de critérios estudados para quantificação da vazão a outorgar nas bacias hidrográficas do Brasil: critérios baseados em vazão de referência e critérios baseados em quantidade de falhas pré-estabelecidas.

A principal crítica existente a respeito do critério de vazão de referência, em bacias onde a demanda é maior que a oferta, está na questão da subutilização da água nos meses em que a vazão natural supera a vazão fixada. As principais vantagens desse critério são a confiabilidade de atendimento e a simplicidade de aplicação dessa metodologia. É importante ressaltar que, em regiões semi-áridas, a questão da confiabilidade de atendimento torna-se um ponto bastante relevante, pois a falta de recurso hídrico por alguns meses pode implicar em situações de grandes prejuízos econômicos e sociais, como por exemplo, perda de culturas na irrigação. Convencer um irrigante que ele terá mais vazão, porém não terá grande segurança que esta mesma vazão estará disponível para ele na maior parte do tempo, não é tarefa fácil.

Por outro lado, observando os estudos baseados no critério de quantidade de falhas pré-estabelecidas, nota-se que, apesar da vantagem de maior alocação de água aos usos, a metodologia apresenta desvantagens de diminuição de confiabilidade do atendimento e complexidade de implementação, necessitando de melhor aparelhamento do sistema de gerenciamento e de maior freqüência de monitoramento dos pontos de controle, o que

implica em maior demanda de profissionais qualificados.

Diante do exposto, a situação aparentemente ideal seria uma metodologia que unisse a confiabilidade e simplicidade encontradas no critério de vazão referencial com a utilização das vazões excedentes sugeridas no critério de falhas pré-determinadas. Porém, até o momento, não são encontrados na literatura trabalhos nesta linha.

Neste estudo pretende-se criar uma metodologia inovadora onde seja possível atender demandas com vazões fixas ou variáveis, em sub-bacias de contribuição delimitadas por reservatórios, com confiabilidade de atendimento que dependa da prioridade de atendimento ao usuário e da sua localização na bacia hidrográfica e da situação e dinâmica hídrica do manancial.

Deve-se ressaltar, no entanto, que não existe uma metodologia consagrada que possa ser utilizada unanimemente em todos os sistemas hídricos principalmente porque cada sistema possui suas próprias particularidades e a escolha de uma metodologia depende, dentre outros fatores, das características da região, sejam essas físicas, econômicas ou sociais. Portanto, a pesquisa aqui apresentada tem o intuito principal de contribuir através de avanços significativos com o desenvolvimento de novos horizontes no que diz respeito ao estabelecimento de critérios de determinação de vazões máximas outorgáveis para trechos de rios barrados por reservatórios.

TENTATIVAS DE USO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA REPRESENTAR O PROCESSO DE OUTORGA

A revisão de literatura mostra a existência de vários modelos para o estudo da outorga em bacias hidrográficas. Todavia, a grande maioria dos modelos utilizados como suporte para o processo de emissão de outorgas no Brasil baseia-se em técnicas de simulação. Essas técnicas, apesar de utilizadas em vários casos, não são universalmente aplicadas a todas as situações que podem ocorrer em se tratando de outorga de uso de água. Especificamente, para este trabalho, não foi possível a escolha de um modelo já existente, portanto, o desafio maior do estudo tornou-se criar um modelo de outorga que atenda às sub-bacias controladas por reservatórios e que possua um grau aceitável de complexidade para não torná-lo inviável em sua implantação.

O estudo de caso utilizado nesta pesquisa é a sua aplicação ao sistema de usuários e reservatórios da bacia do rio Piancó – PB, descrito no artigo associado, a segunda parte publicada nesta edição. Buscou-se criar um modelo que se adequasse às características do sistema e descrevesse situações que pudessem servir de suporte para uma política de gestão na bacia.

Até a obtenção do resultado final do modelo de outorga, muitas tentativas utilizando modelos e critérios de outorga já existentes na literatura foram feitas com o intuito de atingir os objetivos propostos neste estudo. Algumas dessas tentativas e as razões pelas quais não foi possível o uso de cada uma delas serão brevemente descritas a seguir.

Inicialmente buscou-se, para representação do processo de outorga, um modelo de simulação. Escolheu-se o Acquanet, que é um modelo de rede de fluxo desenvolvido pelo LabSid da Escola Politécnica da USP e baseado no MODSIMP32, programa criado por John Labadie na Colorado State University (Labadie et al., 1984 e Azevedo et al., 1997). O Acquanet foi escolhido por que, a primeira vista, apresentava características satisfatórias para a realização do estudo, poderia efetuar cálculos de maneira seqüencial no tempo, através de simulações contínuas ou considerando um horizonte de simulação, e atribuir prioridades a demandas. Além disso, os reservatórios do sistema estudado poderiam ser trabalhados isoladamente ou de maneira integrada.

Através do Acquanet pôde-se testar alguns critérios para estabelecimento da vazão máxima outorgável: critério baseado em vazão regularizada (classificado como estático, onde os valores das vazões são pré-fixados e obtidos através de séries históricas) e critério baseado em quantidade de falhas pré-estabelecidas (classificado como dinâmico, onde a alocação da água é otimizada, tentando-se evitar que, em épocas do ano com maior disponibilidade hídrica, restrições ao usuário sejam impostas).

O modelo de simulação utilizando vazão regularizável

Testou-se, através do uso do Acquanet, o critério de outorga utilizando vazão regularizada com 90% de garantia. Porém, o modelo impedia que a análise de mais de um pedido de outorga fosse realizada para um mesmo reservatório, pois, apesar do Acquanet trabalhar com prioridade de atendimento, não assegurava que as garantias de atendimento às demandas mais prioritárias fossem mantidas constantes e, portanto, não conseguia convergir para uma solução viável.

Para entender melhor, imagine que um usuário recebeu autorização de outorga de direito de uso de uma certa quantidade de água com uma garantia de 90%. Outras demandas mais recentes (posteriores a esta), que por ventura venham a ser concedidas, deveriam, primeiro, respeitar o atendimento da demanda anteriormente outorgada sem comprometê-la. Em outras palavras, a cada nova demanda inserida no modelo, uma nova análise dos pedidos anteriores deve ser feita para todo o horizonte de planejamento e só deve ser alocada a água (caso existir) para essa nova demanda se não houver comprometimento dos pedidos de outorga já concedidos (anteriores), salvo se essa nova demanda for prioritária em relação as já autorizadas. No entanto, isso não ocorre e a principal razão está no fato do modelo de simulação ser míope, ou seja, faz a alocação de água para o instante de tempo t em termos das condições do sistema no final do instante $t-1$. Portanto, com a entrada de um novo pedido de outorga (visto, no Acquanet, como uma nova demanda), mesmo com uma prioridade menor, num mês que possui disponibilidade de água nos reservatórios, o mesmo supre todos os requerimentos de outorga, o que pode prejudicar o atendimento de outorgas já concedidas em meses subsequentes (ou seja, provoca diminuição da confiabilidade no atendimento de outorgas já concedidas devido a falta de uma previsão de transferências intra ou inter- anuais).

A princípio, imaginou-se que as limitações estariam no Acquanet e tentou-se, ao longo desse estudo, “driblar”, de várias maneiras, o problema, mas a simulação conseguia realizar com sucesso apenas a primeira interação. Optou-se, então, por criar um modelo de simulação em linguagem Matlab e após a elaboração de algumas versões que não atendiam aos requerimentos impostos concluiu-se que esse estudo não é possível de se realizar através apenas de um modelo de simulação.

Modelo de simulação utilizando vazão excedente

Uma segunda tentativa realizada para este estudo baseava-se no critério dinâmico de quantidade de falhas pré-determinadas, proposto por Pereira e Lanna (1996), onde a vazão excedente do atendimento das demandas prioritárias era distribuída entre aquelas de prioridade inferior. Este método, ao invés de fixar uma vazão de referência, fixa a quantidade de falhas de atendimento para cada nível de prioridade. Neste caso, o usuário ao receber o direito de uso da água fica ciente do risco de não suprimento da sua demanda e, caso ocorressem

falhas de atendimento, os usos menos prioritários seriam primeiramente atingidos. Porém, essa metodologia, também, mostrou-se falha porque, para a bacia estudada, os valores representativos da vazão excedente eram muito pequenos (devido a própria natureza de acumulação do reservatório para transferências intra e inter- anuais no atendimento as demandas outorgadas, o que reduz a variabilidade das vazões outorgáveis, ou seja, vazões excedentes), o que inviabilizava o uso do modelo.

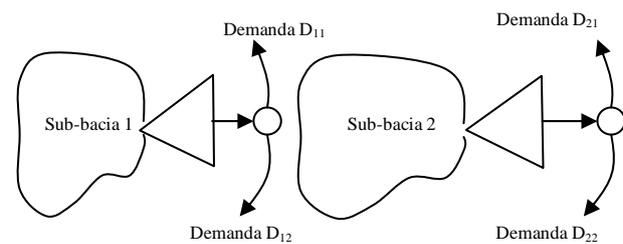


Figura 1 – Esquema das sub-bacias de contribuição delimitadas por reservatórios

Modelo de simulação utilizando vazão regularizada e excedente

Outra tentativa considerava a junção dos critérios estático e dinâmico. Tentou-se criar um modelo em ambiente Matlab onde um valor fixo era estabelecido para a outorga a partir da série histórica de aflúncias do reservatório e baseado na vazão regularizada com 90% de garantia (critério estático). No entanto, era calculada uma vazão excedente para ser liberada em cada mês a novos usuários (critério dinâmico). Esse excedente poderia ser variável mês a mês, porém deveria ser limitado, para não comprometer as demandas prioritárias. Para isso, fixava-se as vazões já outorgadas a cada mês e decidia-se o que mais poderia ser outorgar nos outros meses com uma determinada garantia. Essa metodologia também não apresentou resultados satisfatórios, porque, igualmente ao caso anterior, para a bacia do rio Piancó as vazões excedentes eram muito pequenas.

Além disso, as duas metodologias citadas acima eram realizadas através de simulações que, também, apresentavam as limitações mencionadas anteriormente.

Portanto, após várias tentativas, pôde-se concluir que a utilização de modelos de simulação

para representar o processo de outorga aqui estudado não era adequada.

Apesar dos modelos de simulação descreverem a operação de sistemas ao longo do tempo e do espaço e de fornecer informações que permitam a avaliação de comportamento desses sistemas, esses modelos são limitados pela dificuldade de gerar soluções ótimas onde as decisões tomadas no instante t estão relacionadas com as do instante $t+n$, para qualquer t e n cujos valores caiam no intervalo de tempo em estudo. Partindo desse pressuposto, considerou-se a possibilidade de trabalhar com um modelo de otimização, cujos detalhes serão descritos a seguir.

MODELO LINEAR DE OTIMIZAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE PEDIDOS DE OUTORGA

Como mostrado anteriormente, nenhum dos modelos descritos foi capaz de resolver satisfatoriamente o processo de outorga no sistema estudado. Para o desenvolvimento do modelo de outorga apresentado neste trabalho, alguns pontos relevantes foram intensamente discutidos e considerados com base para sua elaboração:

1. A outorga deve ser realizada a partir da sub-bacia de contribuição do reservatório como mostrado na Figura 1.
2. O requerimento mensal de vazão para outorga, para cada usuário, pode ser variado, ou seja, pode ser solicitada uma vazão diferente para cada mês. As vantagens para este tipo de modelagem são:
 - Trabalhar apenas com outorgas de vazões constantes, mês a mês, limita o número de usuários com direito a outorga, principalmente para aqueles que têm diferentes demandas mensais (como, por exemplo, irrigação), pois, caso o usuário não necessite de determinada quantidade de água em um dado mês, esta não poderá ser alocada para um outro usuário, não fazendo melhor uso da capacidade do reservatório de transferir intra e inter-anualmente água para o atendimento das demandas.
 - Se a cobrança pelo uso da água, em um futuro próximo, levar em consi-

deração o pagamento, pelos usuários, pela vazão outorgada, mas não utilizada (modelo inibidor de se pedir outorga sem haver real demanda, o que propicia um aumento no atendimento de novos usuários), não haverá uma reação no sentido da implantação do modelo aqui proposto (permite vazões variáveis). Mesmo quando aplicado o sistema tradicional de outorga (vazões constantes), este modelo pode se adequar a esta situação, por permitir ter vazões mensais iguais.

1. Admite-se que a concessão de outorgas pode ser realizada via um processo seqüencial temporal, ou seja, alguns usuários já detêm a outorga (em termos quantitativo e de confiabilidade no atendimento) enquanto novos usuários estão com processos de solicitação. Esta é uma forma de retratar a realidade dos pedidos de outorga.
2. Caso a demanda hídrica relativa ao reservatório seja superior à oferta, pode-se procurar o(s) reservatório(s) imediatamente a montante e realizar um estudo para saber se existe possibilidade de uma possível transferência de água. Se, ainda assim, não for possível, pode-se trabalhar com a possibilidade de utilização de água de reservatórios próximos ao reservatório com déficit.

O modelo de outorga proposto neste estudo tem, como importante característica, o fato de ser aplicado em bacias controladas por reservatórios. Por ser um modelo linear de otimização, o estudo da alocação e da garantia de atendimento para uma nova demanda é realizado para toda a série considerada e a alocação de água para uma nova demanda só é feita caso exista a alocação de água para as demandas anteriores mantendo-se suas confiabilidades. Isso é conseguido via um sistema de priorização de atendimento.

Fundamentos teóricos e implementação do modelo

Para avaliar a garantia de atendimento de um reservatório a uma determinada demanda, o procedimento a ser empregado deve simular a operação do sistema perante um cenário de vazões aflu-

entes¹ ao longo de um horizonte operacional. Esta simulação deve ser baseada na política de operação padrão (SOP, do inglês *standard operating policy*), que prioriza a liberação de água para uso imediato (Celeste e Billib, 2009; Celeste et al. 2008; Draper e Lund, 2004; Hashimoto et al., 1982). A SOP é a política ótima quando o objetivo é minimizar o déficit total ao longo do horizonte de operação, ou seja, é a regra que fornece a maior confiabilidade e, conseqüentemente, melhor garantia de atendimento. Entretanto, uma vez que a SOP não retém água para uso futuro, poderá causar períodos de déficits graves durante as secas. Isso significa que a SOP, embora maximize a confiabilidade, produz grande vulnerabilidade. Em tais casos, os operadores preferem restringir a liberação imediata de água, a fim de conservá-la e atenuar potenciais falhas futuras de abastecimento humano. Isto é conhecido como *hedging* (proteção) e pode ser obtido a partir de regras de operação derivadas, por exemplo, por meio de técnicas de otimização.

Em um estudo de avaliação de pedidos de outorga, a garantia de atendimento para o pedido prioritário (P1) poderia ser determinada usando a SOP normalmente. Porém, no evento de haver um segundo pedido (P2, menos prioritário), o uso da SOP seria inapropriado. Isso porque, para manter a garantia já determinada para o P1, as liberações do reservatório para este pedido, em cada período de tempo, durante todo o horizonte do cenário empregado, devem estar asseguradas. Acontece que, como um modelo de simulação é “míope”, não seria possível determinar a vazão de alocação atual para o P2 assegurando todas as vazões alocadas para P1 nos futuros períodos, já que o modelo considera apenas o período atual em cada iteração. Isso se torna mais complexo quando as demandas são variáveis no tempo.

Um modelo de otimização poderia lidar com todos os períodos de tempo simultaneamente. Partindo deste princípio, é possível construir um modelo de otimização que “imite” o processo de simulação da SOP, mas que possa, no entanto, assegurar a alocação de todas as vazões necessárias para manter a garantia dos pedidos anteriores.

Para promover uma maior confiabilidade de atendimento às demandas, a SOP tenta alocar, durante cada período de tempo t , simulados seqüencialmente, o máximo volume de água $R(t)$ que possa atender a demanda $D(t)$ do período atual t , sem se

preocupar com os períodos posteriores ($t+1, t+2, \dots, N$; onde N é o horizonte de operação).

Portanto, na SOP, o período atual sempre tem prioridade quando da alocação da água disponível². Mas isto é equivalente a dizer que o objetivo operacional é maximizar uma função “ Z ” do tipo:

$$Z = \sum_{t=1}^N [\alpha_1(t)R(t)] \quad (1)$$

na qual $\alpha_1(1) > \alpha_1(2) > \dots > \alpha_1(N)$, ou seja, a prioridade de alocação no período 1, $\alpha_1(1)$, é maior do que a prioridade no período 2, $\alpha_1(2)$, que, por sua vez, é maior do que a do período 3, $\alpha_1(3)$, e assim por diante. N é o horizonte de operação.

A liberação $R(t)$ deve ser, obviamente, menor ou igual à demanda $D(t)$ e deve obedecer a equação do balanço hídrico do sistema, descrita a seguir, mantendo o armazenamento $S(t)$ em cada período dentro dos limites de volume morto³ (S_{dead}) e máximo (S_{max}):

$$S(t) = S(t-1) + I(t) - E(t) - R(t) - Q(t) - Sp(t); \forall t \quad (2)$$

na qual $I(t)$ é o volume afluente, $E(t)$ é o volume evaporado e $Sp(t)$ é o volume que eventualmente verterá do reservatório no período t . Quando $t = 1$, $S(t-1)$ é igual a S_0 , o volume inicial no reservatório.

$Q(t)$ armazena a soma dos valores das alocações já outorgadas para os pedidos avaliados anteriormente ao atual. Dessa forma, estes valores e, conseqüentemente, as garantias dos pedidos anteriores ficam assegurados. É preciso observar que, da forma como o modelo é construído, a mesma série de afluências de tamanho N deve ser usada na avaliação de todos os pedidos. A cada nova outorga, a confiabilidade de atendimento do novo usuário pode ser menor, mas os usuários anteriores mantêm suas garantias. Ao final, todos os pedidos de outorga são

² Visto, também, que a SOP não realiza *hedging* para atender períodos futuros.

³ Na verdade, o limite de volume morto pode ser violado pela SOP quando, por exemplo, o volume inicial já estiver no morto e não houver afluência, o que faz com que o volume final seja menor do que o morto em conseqüência da evaporação.

¹ A garantia encontrada serve apenas para este cenário. As incertezas poderiam ser incorporadas com o uso de vários cenários e construindo a distribuição de frequência das garantias.

analisados seqüencialmente, como mostra a Figura 3.

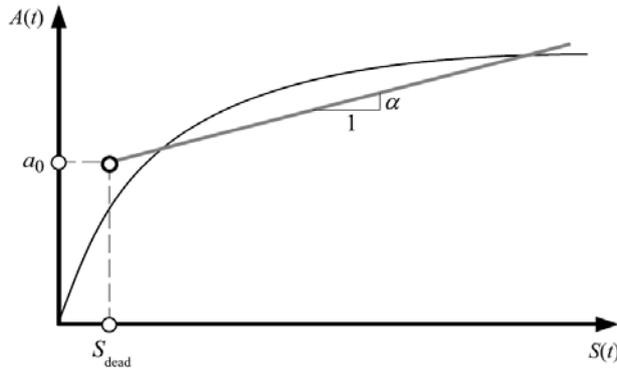


Figura 2 – Linearização da curva área-volume

Como o modelo é implementado em Matlab, que trabalha apenas com problemas de minimização, a formulação torna-se:

$$\min \sum_{t=1}^N [-\alpha_1(t)R(t)] \quad (3)$$

sujeito a

$$S(t) = S(t-1) + I(t) - E(t) - R(t) - Q(t) - Sp(t); \forall t \quad (4)$$

$$0 \leq R(t) \leq D(t); \forall t \quad (5)$$

$$S_{dead} \leq S(t) \leq S_{max}; \forall t \quad (6)$$

$$Sp(t) \geq 0; \forall t \quad (7)$$

As Equações 4, 5, 6 e 7 tratam, respectivamente, de restrições quanto ao balanço hídrico no reservatório, do atendimento às demandas, da capacidade volumétrica e volumes operacionais mínimos e do vertimento.

Uma forma de incorporar a evaporação é através da linearização da curva área-volume do reservatório, mostrada na Figura 2, escrevendo $E(t)$ como uma função do armazenamento médio no início e final do intervalo de tempo atual:

$$E(t) = e_0(t) + e(t) \left[\frac{S(t-1) + S(t)}{2} \right] \quad (8)$$

em que $e_0(t)$ é a perda fixa por evaporação e $e(t)$ é a perda por evaporação por unidade de volume dadas por:

$$e_0(t) = (a_0 - \alpha S_{dead})\varepsilon(t) \quad (9)$$

$$e(t) = \alpha\varepsilon(t) \quad (10)$$

onde a_0 é a área na reta de regressão correspondente a S_{dead} , α é a declividade da reta, e $\varepsilon(t)$ é lâmina de evaporação no tempo t .

Substituindo $E(t)$ da Equação (2) pela expressão em ((8)) fornece a seguinte forma linear da equação da continuidade:

$$\left[1 + \frac{e(t)}{2} \right] S(t) = \left[1 - \frac{e(t)}{2} \right] S(t-1) + I(t) - e_0(t) - R(t) - Sp(t) \quad (11)$$

De acordo com Celeste e Billib (2009), para evitar que o modelo gere vertimentos quando o armazenamento no reservatório estiver abaixo da sua capacidade, deve-se introduzir uma variável adicional de déficit, $\delta(t)$, definida neste caso pela expressão:

$$S(t-1) + I(t) - E(t) - D(t) - Q(t) - Sp(t) + \delta(t) = S_{max} \quad (12)$$

Notar o uso da demanda $D(t)$ no quarto termo do lado esquerdo da expressão. Este lado esquerdo nada mais é do que o armazenamento final quando vertimento ocorre, que é igual ao volume máximo, como indicado pelo lado direito da expressão. Por definição, quando há vertimento $Sp(t)$, o déficit $\delta(t)$ é zero e vice-versa. Isso significa que o lado esquerdo da Equação (12) ainda é igual a S_{max} mesmo se não houver vertimento. Para implementar isso no modelo, um outro objetivo deve ser minimizar a soma do vertimento e déficit (Celeste e Billib, 2009).

Levando-se todos os fatores acima em consideração, o modelo final torna-se um problema de programação linear com a seguinte formulação:

$$\min \sum_{t=1}^N [-\alpha_1(t)R(t)] + \alpha_2 \sum_{t=1}^N [Sp(t) + \delta(t)] \quad (13)$$

$\alpha_1(1) > \alpha_1(2) > \dots > \alpha_1(N) > \alpha_2$

sujeito a

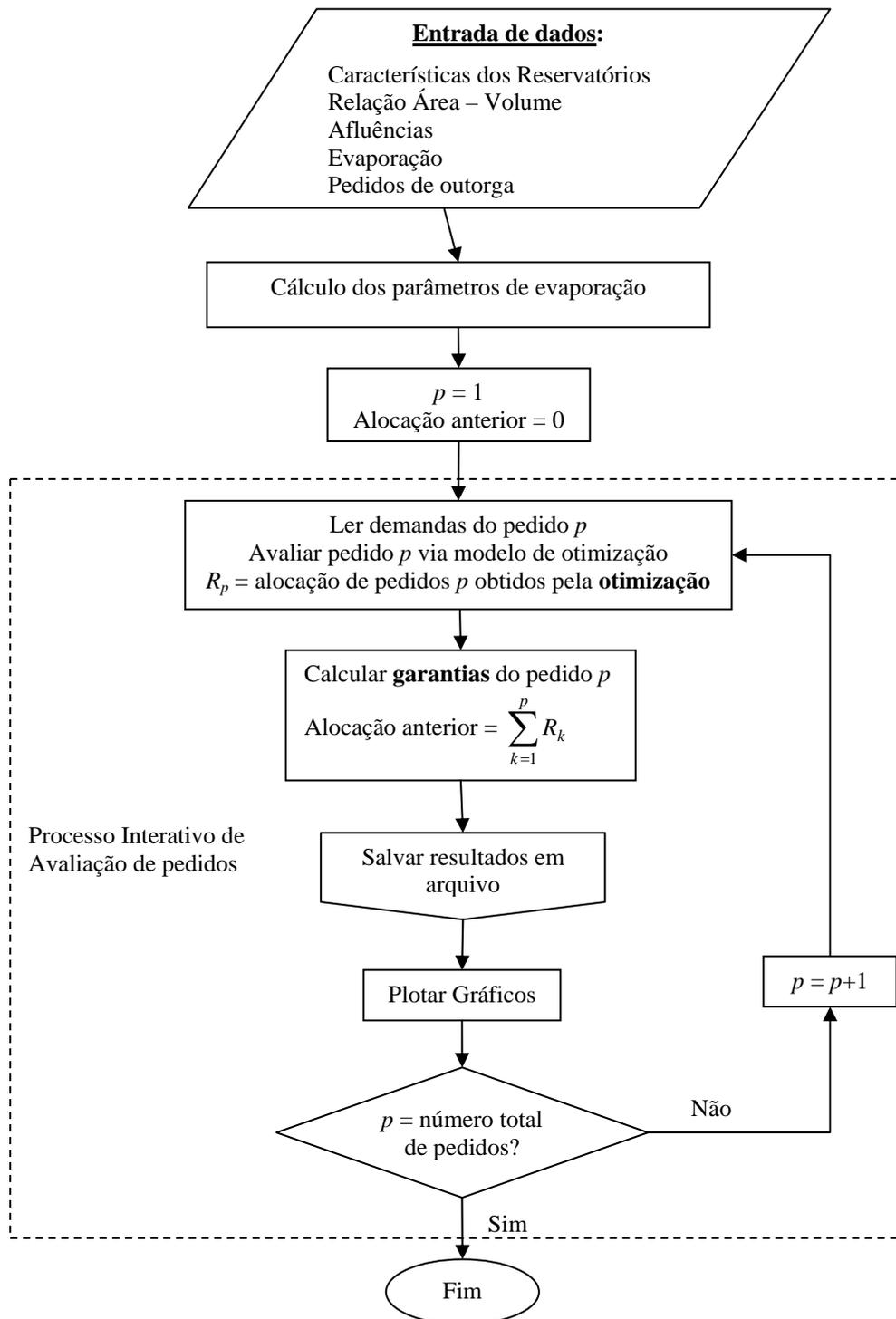


Figura 3 – Fluxograma do modelo de outorga

$$\left[1 + \frac{e(t)}{2}\right] S(t) = \left[1 - \frac{e(t)}{2}\right] S(t-1) + I(t) - e_0(t) - R(t) - Q(t) - Sp(t); \forall t \quad (13)$$

$$\left[1 - \frac{e(t)}{2}\right] S(t-1) - \frac{e(t)}{2} S(t) + I(t) - D(t) - Q(t) - e_0(t) = S_{\max} - \delta(t) + Sp(t); \forall t \quad (14)$$

$$0 \leq R(t) \leq D(t); \forall t \quad (15)$$

$$S_{\text{dead}} \leq S(t) \leq S_{\max}; \forall t \quad (16)$$

$$\delta(t) \geq 0; \forall t \quad (17)$$

$$Sp(t) \geq 0; \forall t \quad (18)$$

no qual α_2 é a prioridade para minimizar a soma do vertimento e déficit (menor do que $\alpha_1(N)$). Como mencionado acima, o segundo termo da função objetivo **Erro! Fonte de referência não encontrada.** juntamente com a restrição (14) são apenas artifícios para que o modelo não forneça vertimentos quando o armazenamento for menor do que o volume máximo do reservatório.

O fluxograma de aplicação do modelo de otimização para a avaliação de uma série de pedidos de outorga é apresentado na Figura 3.

CONCLUSÃO

Foi apresentado, neste artigo, um modelo de outorga para bacias hidrográficas controladas por reservatórios que leva em consideração:

- a inclusão de demandas de água variáveis no tempo, que, provavelmente, permitirá elevar o número de outorgas para os múltiplos usos da água;
- a alocação da água em função da ordem de prioridade, possibilitando a minimização de conflitos de uso;
- o estabelecimento da confiabilidade de atendimento para cada pedido de outorga;
- a adequação da disponibilidade local à demanda local de água, através da análise do processo de outorga por sub-bacias de contribuição, de acordo com sua dinâmica temporal; e

- a possibilidade de análise de pedidos de outorga na forma incremental, sem comprometer as outorgas já concedidas.

Estas características só puderam ser obtidas com o desenvolvimento de um modelo de otimização aonde o atendimento às demandas de água no mês t dependem do atendimento às demandas no mês $t+n$, sendo que o intervalo de tempo entre t e $t+n$ esteja dentro dos limites estabelecidos para estudo. Desta forma, é construído um sistema de equações que atuam como restrições e são resolvidas, simultaneamente, para satisfazer todos os requerimentos do problema. Para as outorgas já concedidas, os valores alocados são automaticamente descontados da disponibilidade hídrica, deixando o programa otimizar apenas o possível excedente hídrico, mantendo, assim, a confiabilidade na qual foi previamente outorgada.

A metodologia apresentada tem facilidade para ser aplicada à grandes quantidades de dados, ou grandes sistemas, mesmo tendo em seu bojo um processo de otimização, que, em geral, é realizado para um número reduzido de anos (otimiza a alocação de água para cada usuário, independentemente, ou um grupo de usuários segundo uma ordem de prioridade de atendimento). Isso permite aumentar o grau de confiabilidade no atendimento às vazões outorgadas, através da possibilidade de um aumento na série temporal de dados utilizados para análise e, conseqüentemente, a inclusão de uma maior quantidade de eventos extremos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do programa da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, L. G. T.; REGO, M. F.; BALTAR, A. M.; PORTO, R. (2003). *Sistema de suporte à decisão para outorga de direitos de uso da água no Brasil: uma análise da situação brasileira em alguns estados*. Bahia Análise & Dados. Salvador – BA. v.13, n. especial, p. 481-496

- CÂMARA, A. C. F. C.; LANNA, A. E. L. (2002). *Proposta para análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do rio Gramame (PB)*. CD-Rom do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Macaé – AL.
- CELESTE, A. B.; BILLIB, M. (2009). *The role of spill and evaporation in reservoir optimization models*. Water Resources Management, DOI: 10.1007/s11269-009-9468-4.
- CELESTE, A. B.; SUZUKI, K.; KADOTA, A. (2008). *Integrating long- and short-term reservoir operation models via stochastic and deterministic optimization: Case study in Japan*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 134, n. 5, p. 440–448.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. (2005). *Otimização e simulação comparativa de cenários de outorga*, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v10, n3, p. 75-91
- DRAPER, A. J.; LUND, J. R. (2004). *Optimal hedging and carryover storage value*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 130, n. 1, p. 83–87.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J. R.; LOUCKS, D. P. (1982). *Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation*. Water Resources Research, v. 18, n. 1, p. 14–20.
- LABADIE, J. W. et al. (1984). *Network analysis of raw supplies under complex water rights and exchanges: Documentation for program MODSIM3*. Colorado Water Resources Institute, Fort Collins, Colorado, EUA.
- MEDEIROS, M. J. e NAGHETTINI, M. (2001). *Análise da viabilidade de aplicação de um fator de correção anual para o critério de vazão de outorga adotado no estado de Minas Gerais*. Anais Virtual do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa. Aracajú-SE.
- PEREIRA, J. S. (1996). *Análise de critérios de outorga e cobrança pelo uso da água na Bacia do Rio dos Sinos, RS*. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS. 108p.
- PEREIRA, J. S.; LANNA, A. E. L. (1996). *Análise de critérios de outorga de uso da água*. Anais do 3º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Vol. 1, 335-342. Salvador, Bahia.
- RIBEIRO M. M. R. (2000). *Alternativas para a outorga e a cobrança pelo uso da água: simulação de um caso*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre – RS, 200p.
- RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. (2003) *A outorga integrada das vazões de captação e diluição*, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, V8, n3, p. 151-168.
- SILVA, L. M. C.; LANNA, A. E. L. (1997). *Crêterios de outorga de uso da água com base em modelagem agro-hidrológica: metodologia e aplicação (Bacia do rio Branco – BA)*. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. p. 137-142.

A Model of Water Rights Concessions for Reservoir-Controlled Basins: 1. Development of the Model That Covers Multiple Demands and Monthly Variables

ABSTRACT

Water rights permits are important water resource management instruments, as they assure the qualitative and quantitative control of water uses, as well as users' access to water. Water rights in Brazil are ruled by Law 9.433/97, specific state laws and decrees. For the Piancó river basin, located in the semiarid inland region (Sertão) of Paraíba State with the largest water reservoir capacity of the state, the water rights process is more complex due to the current water use conflicts. Therefore, this study concerns the development of a linear optimization model to work with this kind of problem, as it deals with the possibility of water rights concession or not through the use of reservoir sub-basin concepts. It may also be done together with monthly variable flows concession requests, which seems to be more appropriate to water uses in this basin. The application of this model to Piancó river basin has generated coherent results and may be applied to other basins controlled by reservoirs. The study has also shown that approximately 30% of Coremas-Mãe D'Água upstream reservoirs are not able to work with the demands of water rights concession as they cannot fulfill the requirement of 90% for reliability as ruled by State Decree 19.260.

Key-words: Management, Water rights, Model.