



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

AVALIAÇÃO DAS REGRAS DE OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO DA BARRAGEM DE PEDRAS ALTAS, RIO ITAPICURU-BA

Luan Marcos da Silva Vieira¹; Andrea Sousa Fontes² & Yvonilde Dantas Pinto Medeiros³

RESUMO – A gestão da disponibilidade de água no nordeste brasileiro está associada a conflitos entre diferentes usos devido às condições climáticas e regras de operação de reservatórios. Representando esse contexto tem-se o reservatório de Pedras Altas, localizado no rio Itapicuru, estado da Bahia, construído com propósito de atender demandas de abastecimento humano e irrigação dos municípios da região. Em 2012, este reservatório passou também a atender, através adutora do Sisal, áreas antes atendidas pelo reservatório de São José do Jacuípe, localizado em bacia hidrográfica vizinha, que apresentava volume abaixo de seu nível operacional. Com o objetivo de avaliar o desempenho do reservatório de Pedras Altas diante do incremento da demanda, foram simulados três cenários de operação, que representaram o atendimento das vazões de projeto antes e após a implantação da adutora. Foi utilizado o modelo de rede de fluxo Aquanet - Labsid (2003), na versão mensal. Os resultados mostram que apesar da alta confiabilidade do sistema no atendimento as demandas, este apresenta baixa resiliência e alta vulnerabilidade a estiagem, e conseqüentemente baixa sustentabilidade.

ABSTRACT– The availability water management in northeast of Brazil is associated with conflicts between different uses due to weather conditions and operating rules for reservoirs. Representing this context has been the Pedras Altas Reservoir, located in Itapicuru River (Bahia), which aims to meet the human consumption demands and irrigation. In 2012 it also have to meet the Sisal adductor demands, areas previously served by São José do Jacuípe reservoir, located in the neighboring basin, which had lower operating water level. In order to evaluate the performance of the Pedras Altas reservoir with the increased demand, three operation scenarios, which represented the situation before and after the implementation of the pipeline were simulated. The Aquanet model [Labsid (2003)], in its monthly version was used. The results show that despite the high reliability of the system in meeting the demands, this presents a low resilience and high vulnerability, and consequently low sustainability.

Palavras-Chave – Operação de Reservatório; semiárido; modelo de rede de fluxo.

1) Graduando no curso de Engenharia Civil na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). luan_msv@hotmail.com

2) Professora, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). andreafontes@ufrb.edu.br.

3) Professora, Universidade Federal da Bahia (UFBA). yvonild@ufba.br

INTRODUÇÃO

A disponibilidade restrita de água em determinados períodos devido as características climáticas do semiárido compromete o atendimento a demanda hídrica para abastecimento humano, industrial e irrigação e outros usos, gerando assim, efeitos no desenvolvimento social e econômico. Assim, por muito tempo vêm-se criando alternativas preventivas contra o não atendimento das demandas da sociedade e possíveis conflitos de uso. Na região semiárida a presença de barramentos nos cursos d'água é um cenário constante, como forma de reservar água para períodos de escassez.

O gerenciamento eficiente dos recursos hídricos influenciados por barramentos estabelece medidas essenciais para que a disponibilidade hídrica local garanta o atendimento adequado aos múltiplos usos da água e o controle de demandas, de acordo com interesses coletivos, priorizando o atendimento de demandas como o consumo humano, conforme preconizado na Legislação Federal Brasileira, LEI N° 9.433 de 8 de janeiro de 1997(BRASIL, 1997). Para isto, devem ser estabelecidas regras de operações destes reservatórios, baseados em critérios socioeconômicos, políticos e ambientais, de forma sistêmica, levando em consideração as ofertas de água e demandas dos diversos usos e usuários.

Entretanto, anos que apresentam condições climáticas mais severas, com possibilidade de desabastecimento da população intensifica conflitos de usos e penaliza a manutenção do curso d'água a jusante de barramentos com a premissa de reservar água ou conduzi-la a outras localidades. Esse cenário se apresentou de forma frequente no território baiano no ano de 2012. Com destaque para a bacia do rio Itapicuru que apresenta nos seus rios cerca de 40 barramentos.

A barragem de Pedras Altas, localizado no rio principal dessa bacia, é um exemplo de aproveitamento hidráulico que recebeu um incremento significativo na sua demanda e teve como regra de operação o fechamento da descarga de fundo, priorizando o abastecimento humano. Cabendo uma análise detalhada do comportamento hídrico desse reservatório frente às demandas de projeto para verificação de regras que minimizem prejuízos sociais, econômicos e ambientais considerando a variabilidade climática característica do semiárido.

Para auxiliar o trabalho de gerenciamento dos reservatórios, que envolvem diversas incógnitas (vazão afluente, múltiplos usos, prioridade de uso, perdas por evaporação, capacidade do reservatório, etc.), são utilizados modelos computacionais com técnicas de simulação e otimização, que obtêm resultados de forma flexível e executadas com menor intervalo de tempo.

Aliadas, formam os modelos de rede de fluxo, que trazem propostas alternativas para os problemas em análise, com a verificação d atendimento a diversas demandas e verificação de déficit hídrico.

Diante desse contexto, presente trabalho busca contribuir para o entendimento do funcionamento das regras de operação do reservatório de Pedras Altas, localizado no rio Itapicuru na Bahia.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Itapicuru (Figura 2) está situada na região nordeste da Bahia, com uma área da região de planejamento e gestão das águas de 42 901,01 km² segundo o Plano Estadual de Recursos hídricos do Estado da Bahia, representando cerca de 6,6% do Estado. Sua nascente está localizada ao norte da Chapada Diamantina, próximo a Jacobina (INEMA, 2013).

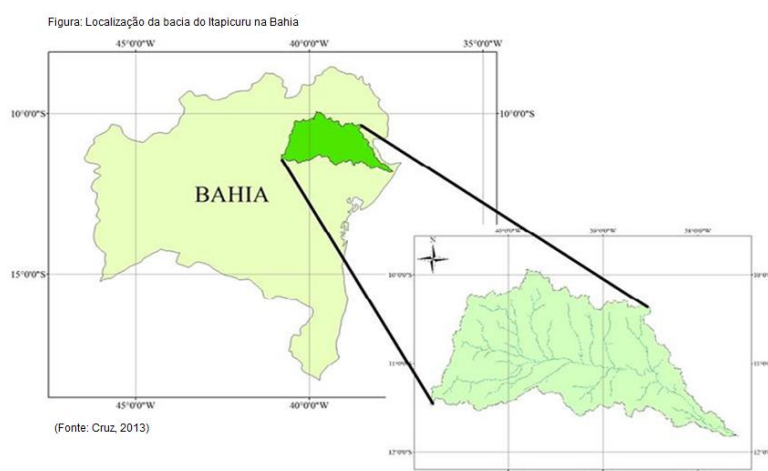


Figura 1- Bacia hidrográfica do rio Itapicuru- Localização da área de estudo (Fonte própria)

Na maior parte de seu curso, a bacia do Itapicuru percorre regiões de climas quentes e semiáridos (81% da área). Ao chegar na Chapada Diamantina, ao norte da região o clima varia para subúmido e seco, com maior incidência de chuvas, o que acontece também na região mais inferior da região, apresentando níveis pluviométricos variando de 1.000 à 1.400 mm (INEMA, 2013).

Localizada no município de Capim Grosso, a uma latitude de 11° 10' e 11° 15' e longitude de 40° 00' e 40° 15', a barragem de Pedras Altas (Figura 3a) foi inaugurada em dezembro de 2002 com principais objetivos de atendimento de demandas de uso rural e urbano. Sua constituição é basicamente terra e enrocamento. Algumas de suas dimensões são: (i) Altura máxima: 24,18 m, (iii) Área de Inundação do reservatório: 759,64 há, (iv) Comprimento da crista: 1090 m. Os volumes característicos de seu reservatório são: (i) Volume em nível normal: 38,45 hm³, (ii) Volume útil: 36,26 hm³, (iii) Volume morto: 2,18 hm³ (CERB, 2013).

O barramento possui vertedor de soleira livre (que pode ser observado também na Figura 4.1), com cota máxima de soleira 360 m e largura de 180 m, sua máxima lâmina de água já verificada foi 3,18 cm e a vazão máxima da descarga de fundo igual a 850 l/s, conforme relatado pelo operador da barragem em visita técnica à barragem no dia 27 de setembro de 2013.

As demandas de projeto referem-se a regularização de vazão para abastecimento (0,626 m³/s), irrigação (0,0341m³/s) e vazão ecológica (0,28m³/s) e a vazão regularizada com 90% de garantia de atendimento é 1,4m³/s. A demanda de abastecimento aumentou depois que o reservatório de Pedras Altas passou a atender também a demanda da barragem de São José do Jacuípe (Figura 4), que não suportou o atendimento às demandas em 2013 (quando atingiu 7% de seu volume útil, como pode ser observado na Figura 3b). Para esse novo atendimento foi construída a adutora do Sisal, inaugurada em dezembro de 2012 com demanda de projeto igual a 0,6 m³/s.

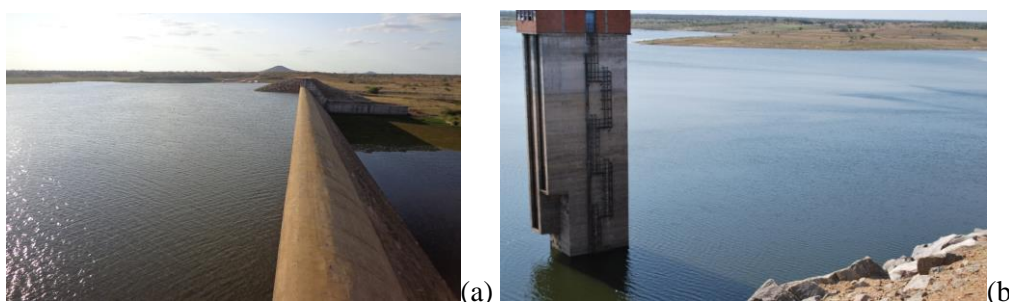


Figura 3 – (a) Barragem de Pedras Altas (b) Barragem São José do Jacuípe-BA (Fonte: Projeto GRANBAR, 2013)

METODOLOGIA

A metodologia adotada para avaliar as regras de operação do reservatório de Pedras Alas consistiu em: (i) levantamento e tratamento de dados hidroclimatológicos (incluindo o preenchimento de falhas da estação 5042000 por meio de correlação de área e auxílio da estação 50430000 de apoio de Capim Gosso); (ii) definição das regras de operação de acordo com a condição hidrológica e prioridade das demandas (construção de cenários) ; (iii) representação do sistema do reservatório de Pedras altas pelo modelo de rede de fluxo ACQUANET; (iv) avaliação do desempenho do sistema e atendimento as demandas de projeto e demanda incremental da adutora do Sisal.

O modelo de rede de fluxo ACQUANET foi desenvolvido pelo Labsid (Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões) da Universidade de São Paulo (USP) fundamentado no MODSIM, criado em 1988, por Jonh W. Labadie, no Colorado State University/ USA (Labadie, *el al*,1999). Esse modelo incorpora esquema de otimização em modelagem de simulação, que essencialmente simula o comportamento complexo de bacias hidrográficas e otimiza a cada mês (acumulando resultados de um mês para o outro). Através dele criam-se redes com reservatórios, demandas,

canais de ligação de forma minuciosa. O programa possui ferramentas de apoio à tomada de decisão do usuário e sua utilização tem sido crescente, devido a sua representação fácil e precisa [ACQUANET, manual do usuário].

Os modelos de rede de fluxo associam características de simulação e otimização da água em larga escala para auxílio na tomada de decisão de planejamento, projeto e operação dos reservatórios. Eles são muito usados quando os propósitos não são alcançados por modelos de Programação Linear, Dinâmica ou Simulação (ROBERTO, 2002).

Tais modelos em geral, são capazes de simular o comportamento de operações, sujeitos a metas de níveis de água nos reservatórios, prioridades e algumas limitações. A bacia hidrográfica é abordada como uma rede de fluxo, compostas de arcos (também chamado de links, ou elos de ligação) e nós. Os arcos representam a conexão entre os nós, são estes, adutoras, canais naturais ou artificiais, trechos dos rios e outros similares. Os nós são elementos pontuais de todo esquema, referem-se aos reservatórios, demandas, confluências e importações. Para êxito, o sistema tem que garantir que o balanço de massa esteja satisfeito, havendo um balanço entre a oferta e demanda e ganho ou perda no transporte (MACHADO e NETO, 2010). Utilizando essa ferramenta foi criado um sistema de rede de fluxo para simular os dados da bacia e critérios estabelecidos para cada cenário de simulação. Para configurar o sistema, foram usados seis nós, representando o reservatório, as demandas e quatro links que ligam estes nós. Na Figura 4 é apresentado o sistema de rede de fluxo do reservatório de Pedras Altas.

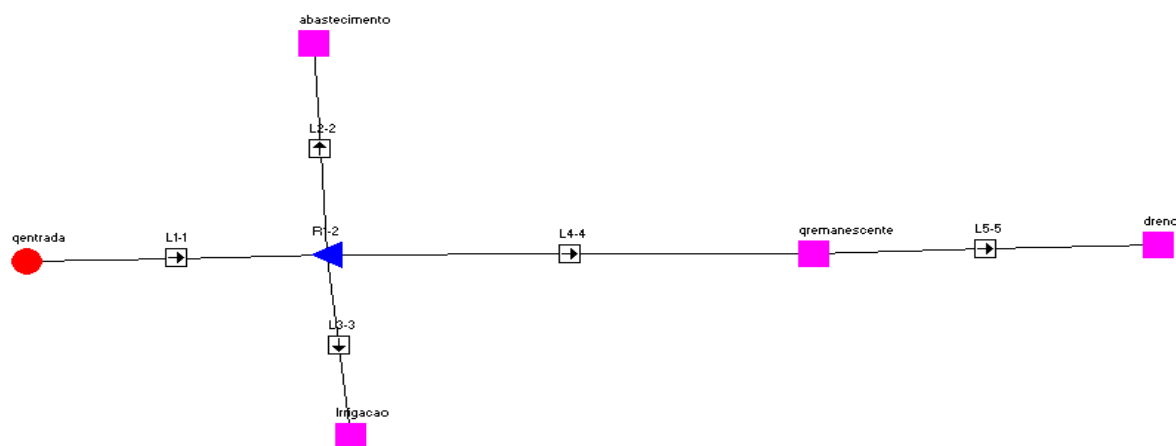


Figura 4- Representação da rede de fluxo do reservatório de Pedras Altas pelo Acquanet (Próprio Autor)

Os dados do reservatório usados no modelo são de projeto, sendo o volume máximo igual ao volume inicial (38,45 hm³) e volume mínimo igual a 2,18 hm³. Para a taxa de evaporação, foi usado dado de precipitação e evaporação pelas normais climatológicas de 1961 a 1990 e realizada a diferença de valores para estabelecer a perda efetiva de água do reservatório por evaporação. Pelo fato de Jacobina pertencer à uma região semiárida, os dados de evaporação colhidos pelas normais

foram multiplicados por 0,85, considerado como valor adequado para correção de dados de tanque classe A.

O primeiro cenário de operação do reservatório foi definido para verificação da vazão com garantia de 90% de atendimento e avaliação da consistência das informações inseridas no modelo. Neste cenário a maior prioridade foi a vazão remanescente (considerando o valor de 20% da vazão regularizada com garantia de 90% de atendimento) com valor 1, e vazão regularizada com garantia de 90% de atendimento (1,4m³/s) com prioridade 2. Esse valor foi atribuído integralmente a demanda de abastecimento, ficando demanda da irrigação nula. Os valores de vazões a serem atendidas durante todo o período em cada demanda foram considerados constantes.

No segundo cenário buscou-se a verificação do grau de atendimento das demandas de projeto sem considerar a demanda incremental, possibilitando uma verificação do funcionamento do reservatório de acordo com o projeto. As prioridades foram mantidas de acordo ao cenário anterior.

O terceiro cenário englobou a demanda incremental para possibilitar a verificação do grau de atendimento das demandas após a implantação da adutora que distribui água para região do Sisal. Assim, foi somado mais 0,6m³/s na demanda de abastecimento, a qual foi mantida constante para todo o período de simulação. Todos os valores das demandas restantes foram também mantidos constantes e assumem os mesmos valores do cenário 2.

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA HÍDRICO

Para melhor interpretação e avaliação dos dados resultantes da operação dos reservatórios integrados a sistemas de recursos hídricos são propostos indicadores de desempenho que auxiliam no planejamento estratégico através da previsão de cenários futuros. Foram utilizados os índices proposto por Hashimoto et al. (1982) apud Faria (2003): Confiabilidade (frequência de falhas do sistema), resiliência (capacidade do sistema retornar ao seu estado inicial após uma falha) e vulnerabilidade (possíveis consequências que uma falha acarreta).

A confiabilidade (C) do sistema se caracteriza como um critério probabilístico que o reservatório em operação terá para alcançar o atendimento de suas demandas, quanto mais perto de 1 for a confiabilidade o valor é considerado satisfatório. A resiliência (R) mede em escala de tempo a capacidade do sistema de retornar ao seu estado regular, ou seja, a recuperação do sistema. A vulnerabilidade (V) é estabelecida pela razão entre volume de déficits pela quantidade de falhas, sendo um indicador que traduz o quanto um sistema é vulnerável a partir da ocorrência de situações inaceitáveis. O índice da sustentabilidade do sistema foi calculado por (FARIA, 2003):

$$Sus = C * R * (1 - V)$$

RESULTADOS

Caracterização hidrológica da área de estudo

Através da comparação da disponibilidade dos dados pluviométricos e dados fluviométricos, pôde-se inferir que o comportamento médio da precipitação no município de Jacobina, integrante da área de estudo, apresenta uma sazonalidade característica, com os meses de novembro a abril apresentando índices de precipitação acima da média. Considerando o período de 1973 a 1983, foi avaliado o comportamento da vazão na estação 50420000, localizada também em Jacobina, e avaliada como representativa para o comportamento da bacia em estudo. Os valores de vazão máxima geralmente ocorrem nos meses de janeiro, fevereiro, março, meses em que ocorrem altos índices de precipitação (chuvas de verão), já os meses de setembro a novembro são meses que apresentam valores baixos de vazão.

Por meio do hidrograma da vazão média mensal, verificou-se que o ano hidrológico característico do período para essa estação fluviométrica teve início no mês de dezembro e que o rio apresentou uma vazão média no período de aproximadamente 3 m³/s.

Essa seção apresenta vazões características de acordo com sua permanência no tempo (calculadas a partir da curva de permanência de vazões diárias), os seguintes valores: (i) Q_{90} igual a 0,317 m³/s, Q_{60} igual a 1,250 m³/s e Q_5 igual a 12,90 m³/s.

Aplicação do Acquanet

CENÁRIO 1: A vazão média fornecida (1,314 m³/s) obteve um valor muito próximo da vazão regularizada em 90% do tempo (1,4m³/s), com uma frequência abaixo da demanda necessária de aproximadamente 9%, diferença pequena quando comparada aos 10% de falha que podem vir a ocorrer, o que indica a consistência dos dados utilizados na simulação. A diferença apresentada pode ser atribuída aos usos distintos de metodologias de preenchimento da serie histórica de vazão e ao período selecionado de análise, que provavelmente não devem ter sido os mesmos.






Resultados referente a vazão remanescente evidenciam o atendimento ao critério de 20% da vazão regularizada com 90% de garantia, apresentando frequências abaixo da demanda necessária de 3,03%. A falha de atendimento a vazão remanescente mesmo sendo prioritária ocorreu pelo esvaziamento do reservatório em 13 meses atingindo o volume morto e sem vazão afluente nesses meses que atenda a vazão remanescente.

CENÁRIO 2: Esse cenário alcançou atendimento de todas as demandas do sistema, não sofrendo restrições em nenhuma delas. Com estes resultados, observa-se a não influência das prioridades no atendimento destas demandas. As vazões afluentes e efluentes permanecem semelhantes durante todo período de análise e as vazões efluentes permanecem tendo cerca de 0,94

m³/s em maior parte do tempo. Diferente do Cenário 1, em 48,99% do tempo, ou seja, em 28 meses, o reservatório apresentou volume menor que o volume máximo do reservatório e aproximadamente 96% do tempo o reservatório verte.

CENÁRIO 3: Os resultados das demandas considerando abastecimento com prioridade 1, vazão remanescente com prioridade 10, reservatório com prioridade 20 e irrigação com prioridade 80 estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo dos resultados das demandas – dados de saída do modelo ACQUANET

Demandas	Tempo máximo abaixo da demanda necessária (meses)	Frequência abaixo da demanda necessária (%)	Volume acumulado dos déficits (Mm ³)	Vazão média fornecida (m ³ /s)
				
abastecimento	8	4.80	35.557	1.190
Irrigacao	54	66.92	20.893	0.010
qremanescente	9	5.30	14.717	0.266

A demanda de água para o abastecimento humano apresentou falha no atendimento em aproximadamente 5% do tempo, mesmo considerando esta como prioritária. Entretanto, este valor está de acordo com o utilizado para dimensionamento do volume do reservatório.

A irrigação e vazão remanescente tiveram maiores comprometimentos em seu atendimento, sendo 66,92% e 5,30% de falhas respectivamente, dos 33 anos analisados. Estas possíveis falhas podem provocar o fechamento da descarga de fundo, o que já está acontecendo desde 21 de setembro de 2013, contribuindo para o surgimento de diversos conflitos de usos e usuários nos atendimentos das demandas a jusante. Um fator importante que exerce direta influência para as falhas resultantes são baixas prioridades estipuladas, obtendo valores médios fornecidos iguais a 0,010 m³/s e 0,266 m³/s, nesta ordem.

Comparando aos resultados dos cenários 2, a alteração das regras de operação com incremento da demanda de abastecimento humano altera o funcionamento da barragem de uma situação de total garantia de atendimento das demandas, comprometendo a situação de atendimento em certos períodos. O desempenho das vazões afluentes e efluentes do reservatório é demonstrado na Figura 5.

Em 66,67% do tempo (54 meses) o volume meta do reservatório não foi alcançado, um tempo representativo diante do período analisado. Por pertencer ao semiárido, região com grande incidência solar, no reservatório foram notadas taxas de evaporação consideráveis, com valores de perda de água armazenada por esse fenômeno atingindo 0,91 Mm³/mês representando 25% da vazão regularizada com 90% de garantia.

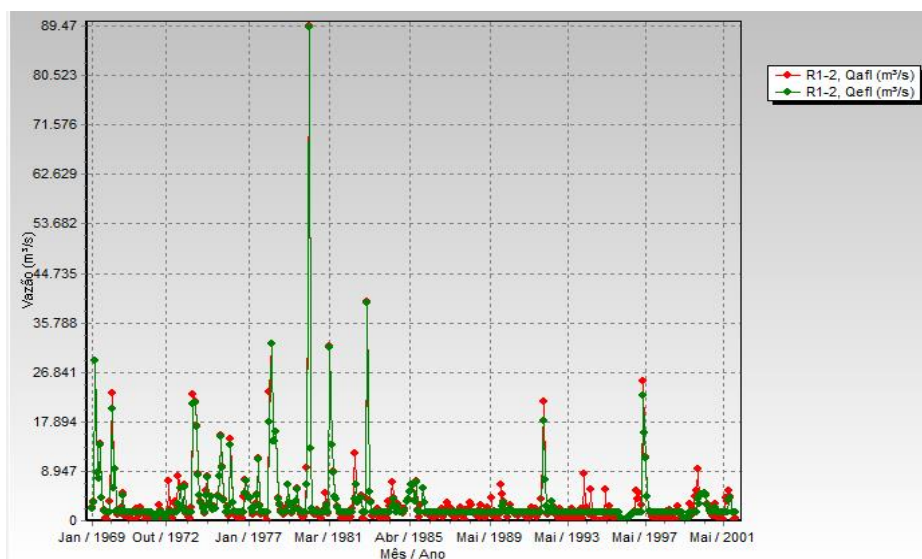


Figura 5 - Vazões afluentes e efluentes do reservatório de Pedras Altas– (vazão afluente representada pela linha vermelha e vazão efluente ao reservatório representada pela linha verde) – saída do modelo Acquanet

Os resultados obtidos para a confiabilidade das demandas de abastecimento e vazão remanescente do cenário 3 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Indicadores de desempenho

Demandas	Confiabilidade	Resiliência	Vulnerabilidade	Sustentabilidade
Abastecimento	0,952	0,21	0,842	0,032
Vazão Remanescente	0,947	0,238	0,952	0,011
Irrigação	0,331	0,113	1	0

Para avaliação de atendimento foi utilizado o índice de confiabilidade, que segundo os resultados atesta a confiança do sistema para as demandas de abastecimento e vazão remanescente, o que já não ocorre para irrigação devida principalmente a baixa prioridade estipulada. Observando a resiliência percebe-se a baixa capacidade do sistema retornar ao seu estado satisfatório, apresentado o maior valor para a demanda de vazão remanescente com 0,238. Na vulnerabilidade a melhor situação é a mínima, ou seja, mais próximo de 0, dessa forma, temos que o abastecimento é o menos vulnerável entre as três demandas, mas o que não representa bom resultado neste caso, com alto valor de 0,842. De acordo com os índices de desempenho, verifica-se ainda que com o incremento da demanda o sistema analisado não apresenta sustentabilidade adequada.

CONCLUSÃO

Com a aplicação de modelo de rede de fluxo, foram avaliadas as diferentes regras de operação do reservatório da barragem de Pedras Altas, quanto ao atendimento dos múltiplos usos da água e usuários. Os resultados encontrados confirmaram a capacidade dessa ferramenta

computacional em auxiliar tomadas de decisão sobre a operação de reservatórios. Esses modelos realizam o balanço hídrico do sistema alocando a água para atendimento das demandas de acordo com prioridade definida pelo usuário.

Pelos resultados alcançados, o reservatório de Pedras Altas atende as demandas de projeto sem nenhuma restrição operativa, o que não é verificado após a implantação da adutora em 2012, que fez com que o atendimento fosse limitado após o incremento de 0,6 m³/s na demanda de abastecimento. Com essa situação o reservatório atende as demandas locais em cerca de 95% do tempo sem ocorrência de falhas no período, valor aceitável devido a variabilidade hidrológica natural.

Em todos os cenários simulados, percebeu-se a dificuldade do reservatório de operar em seu volume meta. Os valores obtidos são relevantes para o conhecimento do comportamento e desempenho das disponibilidades hídricas do reservatório diante das novas demandas atribuídas ao reservatório de Pedras Altas e das garantias de atendimento a essas demandas.

BIBLIOGRAFIA

ACQUANET – *Modelo integrado para análise de sistemas complexos em recursos hídricos* (2003). Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisão- Labsid- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo,. [disponível via Internet em: <http://www.labsid.com.br/>]. Acesso em 24 de out. de 2013.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União [da República Federativa do Brasil], Brasília. Data da legislação: 20 de setembro de 2010. Publicação DOU, de 21 de setembro de 2010.

FARIA, A. S. Alocação ótima dos recursos hídricos a partir da alocação de um modelo de rede de fluxo. 135.f.: il. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2003.

INEMA - *Instituto do Meio Ambiente e recursos hídricos*. Barragens/ Reservatórios. Inventário das Barragens do estado da Bahia [disponível via Internet em: <http://www.inema.ba.gov.br/gestao-2/barragensreservatorios>]. Acesso em 20 de out. de 2013.

MACHADO, B.G.F.; NETTO O. M. C. “*Análise econômica aplicada à decisão sobre alocação de água entre os usos de irrigação e produção de energia elétrica: O caso da bacia do rio Preto (DF/GO/MG)*” (2010). Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 15, n. 4, Brasília.

ROBERTO, A. N.; PORTO, R. L. L. “*Alocação da água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica*” (1999), in *Água em quantidade e qualidade: o desafio do próximo milênio*, Rio de Janeiro, 1999 .