

## **SIMULAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DA ÁGUA DE DOIS RESERVATÓRIOS NO SEMIÁRIDO PARAIBANO - PARTE 2: OTIMIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA**

*Allan Sarmiento Vieira<sup>1\*</sup> & Wilson Fadlo Curi<sup>2</sup>*

**Resumo** – Este artigo objetiva mostrar o uso de um novo modelo de simulação e verificar o comportamento hídrico dos reservatórios Engenheiro Avidos e São Gonçalo, localizados na região semiárida do Estado da Paraíba. O esgoto não tratado da cidade de Nazarezinho é despejado no reservatório São Gonçalo através do rio Catolé. Os níveis de poluição considerado para os parâmetros de qualidade de água deve satisfazer os níveis de Classe II estabelecidos pela Resolução do CONAMA 375/05. Os resultados mostram que o atendimento a todas as restrições físicas e operacionais e a maioria dos requerimentos das demandas de água foram satisfeitas com uma confiabilidade de 100%, exceto a irrigação de plantações sazonais nas vizinhanças do reservatório São Gonçalo. Os parâmetros de qualidade de água no ponto de controle e no reservatório São Gonçalo, que apresentou altos índices de DBO e FT, foram otimizados e atenderam os requerimentos da Classe II. O modelo de simulação mostrou apresentar um bom desempenho ao otimizar todos os parâmetros mensais de qualidade da água e atendimento das requeridas restrições.

**Palavras-Chave** – Simulação, quali-quantitativa, programação linear.

## **A QUALI-QUANTITATIVE WATER SIMULATION FOR TWO RESERVOIRS IN PARAIBA'S SEMIARID REGION: QUALI- QUANTITATIVE OPTIMIZATION**

**Abstract** – This paper aims to show the use of a new simulation model and verify the water behavior of the Engenheiro Avidos and São Gonçalo reservoirs, located in the semiarid region of Paraíba state. The Nazarezinho's untreated domestic sewage runs into the São Gonçalo reservoir through the Catolé river. The estimated water demand is for the year 2013. The span of time considered was of 36 months. The pollution levels for the considered water quality parameters should satisfy the Class II levels established by CONAMA's Resolution 357/05. The results have shown that all the physical and operational constraints and most of the water demands requirements were met with the reliability of 100%, except the irrigation of seasonal crops planted nearby São Gonçalo reservoir. The water quality parameters at the control point and in the São Gonçalo reservoir, which presented high levels of DBO and FT, were optimized and met Class II requirements. The simulation model have shown to have a good performance by optimizing all the monthly water quality parameters and meeting the required constraints.

**Keywords** – simulation, qualitative and quantitative, linear programming.

<sup>1</sup> \*Professor Doutor Allan Sarmiento Vieira: Universidade Federal de Campina Grande (UACC/CCJS/UFCG): [allan.sarmiento@pesquisador.cnpq.br](mailto:allan.sarmiento@pesquisador.cnpq.br)

<sup>2</sup> Professor Doutor Wilson Fadlo Curi: Universidade Federal de Campina Grande (UAF/CCT/UFCG): [wfcruirui@pesquisador.cnpq.br](mailto:wfcruirui@pesquisador.cnpq.br)

## 1.0 - INTRODUÇÃO

A busca da sustentabilidade de uma bacia hidrográfica se dá através da representação e integração dos efeitos de diferentes agentes naturais e antrópicos situados à montante e à jusante de qualquer escoamento de um corpo d'água em processos de planejamento e gerenciamento. Para Larentis (2004) a avaliação quantitativa dos recursos hídricos deve considerar desde o comportamento hidrológico resultante da precipitação e a evaporação até pelas interferências dos usos da água e as obras hidráulicas, entre outras ações antrópicas. Na avaliação da qualidade da água é necessário integrar o modelo quantitativo com a representação das fontes de poluição e seu transporte nos rios e reservatórios para representar os efeitos integrados ou sinérgicos dos impactos sobre a qualidade da água. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é verificar, sob a ótica quali-quantitativa, o subsistema de reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo da bacia do Alto Piranhas – PB localizado no sertão da Paraíba, utilizando um novo modelo de simulação, baseado em programação linear, que garante o ótimo global, e incorpora as não linearidades através de um processo iterativo de aproximações lineares, até que se atinja uma convergência de tolerância desejada. Além disso, o modelo possui o caráter multiobjetivo por analisar de forma integrada aspectos quantitativos (alocação) e qualitativos (concentrações), ou seja, caso um reservatório libere água para diluir os níveis de poluição, de um determinado parâmetro de qualidade da água, pode gerar interferência no atendimento de outras demandas. Foram consideradas, neste estudo, demandas estimadas para o ano 2013, com horizonte de tempo de 360 meses e metas operacionais para os reservatórios para prevenir impactos de possíveis secas. Os níveis de poluição devem estar enquadrados na Classe II Resolução 357/2005 do CONAMA.

## 2.0 - CARACTERIZAÇÃO DO MODELO QUALI-QUANTITATIVO UTILIZADO

Um modelo de simulação multiobjetivo e quali-quantitativo foi proposto por Vieira, 2011. Seu algoritmo é baseado na aplicação de técnicas de programação linear, permitindo achar o ponto ótimo global, mês a mês, da alocação da água para os usos múltiplos do sistema de reservatórios. São considerados os aspectos hidroclimáticos (precipitação, evaporação e vazões), hidráulicos (características dos componentes hidráulicos do sistema), as demandas (abastecimento, irrigação, etc.) e os níveis de concentrações ou poluição de parâmetros de qualidade da água (a demanda bioquímica de oxigênio - DBO, oxigênio dissolvido - OD, nitrogênio total - NT, fósforo total - FT, clorofila-a - CLA e coliforme termotolerante ou fecal - CF) de acordo com as metas estabelecidas pelo CONAMA 357/05. Para estimar a qualidade da água de rios e reservatórios e avaliar os níveis de poluição foi incluído as fontes de poluição e os processos de autodepuração associados aos parâmetros de qualidade de água considerados. Com relação a avaliação do desempenho do atendimento às demandas do sistema em estudo, além dos gráficos, foram incluídos no modelo de simulação o cálculo de alguns indicadores, como a confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade e sustentabilidade.

## 3.0 – DADOS E CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA AVALIADO

A área de estudo pertence ao conjunto de sete sub-bacias, da bacia hidrográfica do Alto Piranhas, localizado no extremo oeste do Estado da Paraíba entre as latitudes 6° 36' 47'' e 7° 22' 56'' Sul e entre as longitudes 37° 48' 15'' e 38° 49' 15'' Oeste no Sertão Paraibano (Figura 1). O subsistema de reservatórios Engenheiro Ávidos e São Gonçalo, objeto do estudo, está atrelado a um perímetro irrigado privado e público, sendo que estes não consideram a qualidade da água nas suas operações. As principais aglomerações urbanas são as cidades de Cajazeiras, Sousa e Marizópolis.

Os dados do subsistema que vão servir de entrada no modelo foram coletados do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Alto Piranhas (SIENTEC, 1997), de livros especializados como o Von Sperling (1996) e Tucci (2005), dos sítios da AESA-PB e HIDROWEB ou estimadas por metodologias consagradas na literatura, como por exemplo, cálculo da vazão de retorno das cidades.

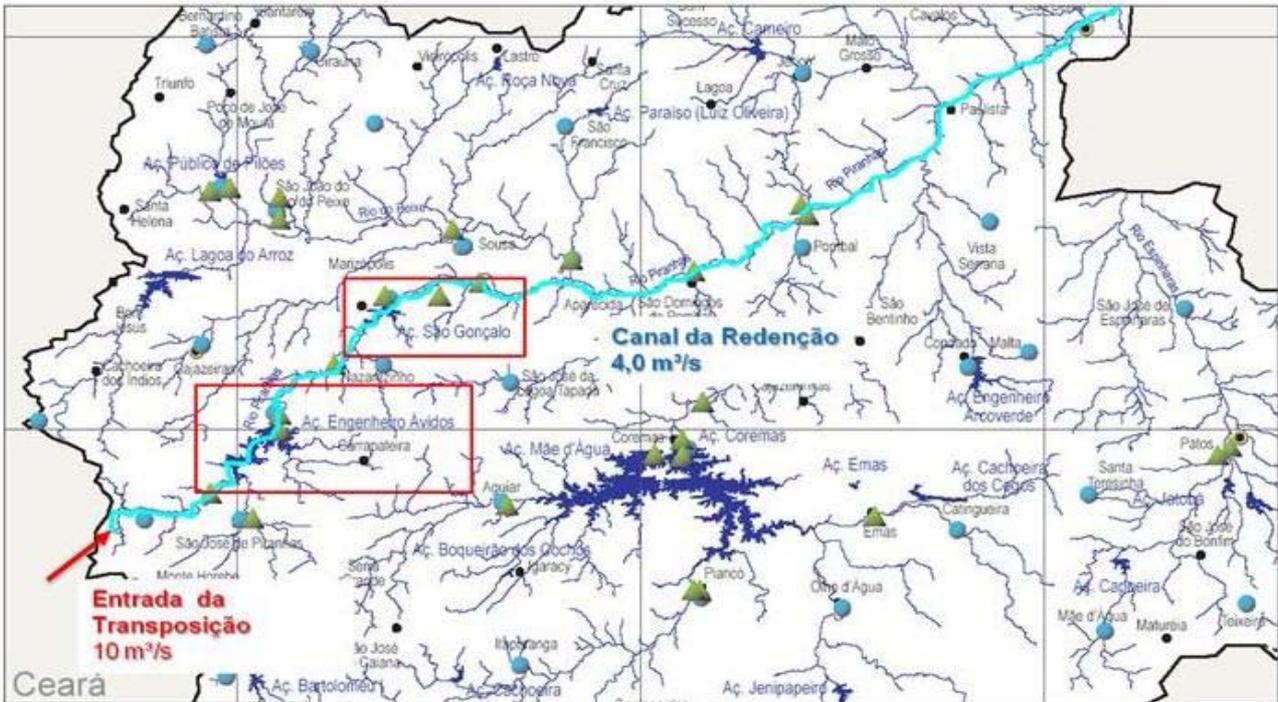


Figura 1 – Sistema Estudado (Fonte: Ribeiro, 1990)

O uso do novo modelo de simulação requer a identificação das variáveis de decisão e a atribuição dos níveis de prioridade de cada objetivo. Na Figura 2 estão mostradas as variáveis de entrada e saída de cada componente do sistema, cujos resultados serão disponibilizados pelo modelo de simulação para serem analisados, contemplando o atendimento aos possíveis usos e os níveis de enquadramento das concentrações da qualidade da água.

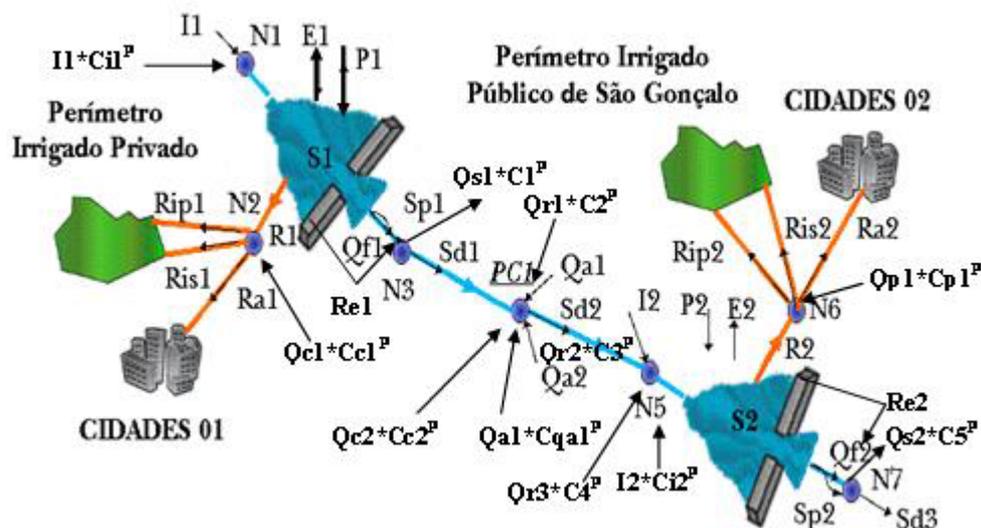


Figura 2 – Layout do subsistema com as variáveis quantitativas e qualitativas.

**Legenda:** Ii – Vazão afluente nos reservatórios Si; Ei – Evaporação; Pi – Precipitação; Ri – Retiradas; Sdi – Vazão defluente; Ci – Concentrações de um determinado parâmetro; Qfi – Descarga de fundo; Spi – Vertimento; Qai – Vazão afluente no ponto de controle PC1;

#### 4.0 – METODOLOGIA

As demandas de água e as metas operacionais dos reservatórios foram consideradas prioritárias. As prioridades de atendimento dos níveis de concentração (Classe II) de DBO, FT e OD nos pontos de controle são iguais as das demandas quantitativas. Considerou-se ainda, todas as restrições físicas e operacionais do sistema.

As demandas máximas mensais de abastecimento humano foram estimadas para o ano de 2013. As demandas de irrigação foram calculadas segundo o plano de cultivo e o balanço hídrico do solo para as culturas. Foi utilizada uma área de aproximadamente de 70 ha para o reservatório Engenheiro Ávidos, sendo 50% da área destinada para culturas perenes e 50% para culturas sazonais, e foi utilizada uma área irrigável ótima sugerida por Farias (2004) de aproximadamente 1100 ha para o reservatório São Gonçalo, sendo 50% da área destinada para culturas perenes e 50% para culturas sazonais. O sistema de irrigação considerado para todas as culturas é do tipo gotejamento que possui uma eficiência de aplicação de 92% e a do sistema de irrigação de 90%. A demanda de manutenção dos ecossistemas aquáticos foi estimada em 10% da vazão outorgável.

#### 5.0 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as restrições operacionais do açude Engenheiro Ávidos foram atendidas, inclusive o do volume meta, conforme mostrado na Figura 3. Houve também meses bastantes chuvosos que provocou perdas de água por vertimento. A vazão liberada pela descarga de fundo, do açude Engenheiro Ávidos, apesar de não constar da função objetivo, obedeceu à operação integrada e as restrição da descarga máxima, que é limitada pela sua cota hidráulica em cada mês t, conforme mostrando na Figura 4.

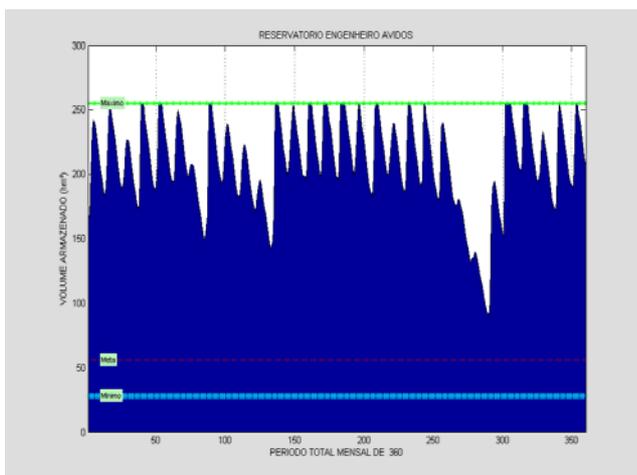


Figura 3 - Comportamento do volume armazenado do açude Eng. Ávidos.

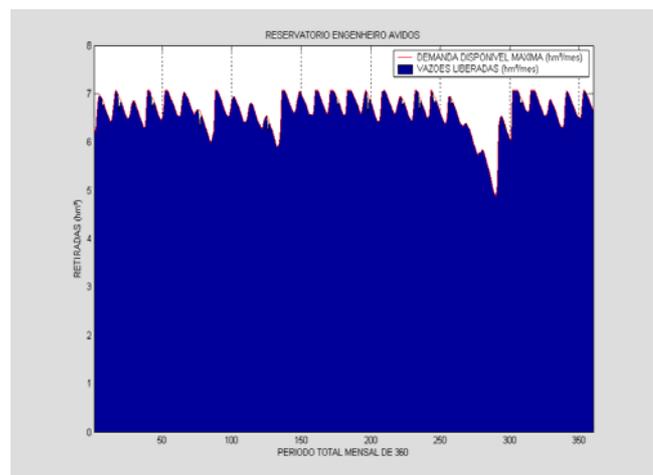


Figura 4 - Vazões liberadas pela descarga de fundo no açude Eng. Ávidos.

Os atendimentos às demandas para o abastecimento, irrigação de culturas perenes e culturas sazonais e ecossistemas aquáticos do rio foram completamente satisfeitos (100%), ou seja, não houve falhas em nenhum setor, gerando um índice de sustentabilidade de 100%.

A Figura 5 mostra o comportamento da DBO no reservatório Engenheiro Ávidos ao longo do tempo de simulação, por ter um volume considerável as concentrações ficaram enquadrada na Classe II, ou seja, ter, no máximo, 5 mg/l. A Figura 6 mostra os ótimos níveis de concentração de OD ao longo do período simulado, isso ocorreu devido aos baixos teores de concentração de DBO (Figura 5) observado no reservatório Engenheiro Ávidos.

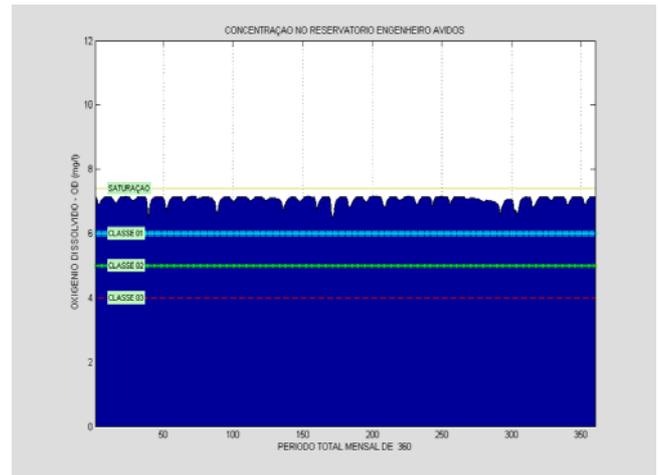
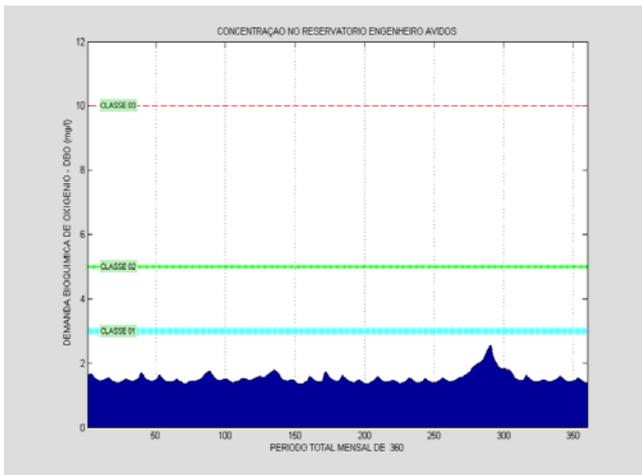


Figura 5 - Comportamento da DBO no açude Eng. Ávidos.

Figura 6 - Comportamento do OD no açude Eng. Ávidos

As metas estabelecidas para o Fósforo Total (FT), Nitrogênio Total (NT), Clorofila-a (CLA) e Coliformes Fecais (CF), no açude Engenheiro Ávidos, foram atendidas.

A Figura 7 mostra as variações mensais da concentração de DBO, que foram otimizadas, ao longo do tempo na saída do Ponto de Controle PC1 para o açude São Gonçalo. É importante lembrar que neste ponto de mistura chega uma concentração mensal e constante de DBO proveniente da cidade de Nazarezinho e do Riacho Catolé e são misturadas e diluídas pelas vazões advindas do açude Engenheiro Ávidos. A Figura 8 mostra o comportamento das concentrações de OD no PC1, onde ocorreu uma melhora significativa com relação ao cenário de otimização quantitativa devido a redução da concentração da matéria orgânica no Ponto de Controle PC1.

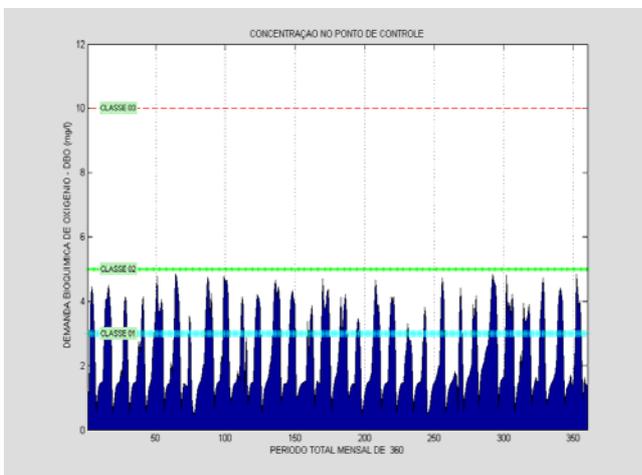


Figura 7 - Comportamento da DBO no Ponto de Controle PC1.

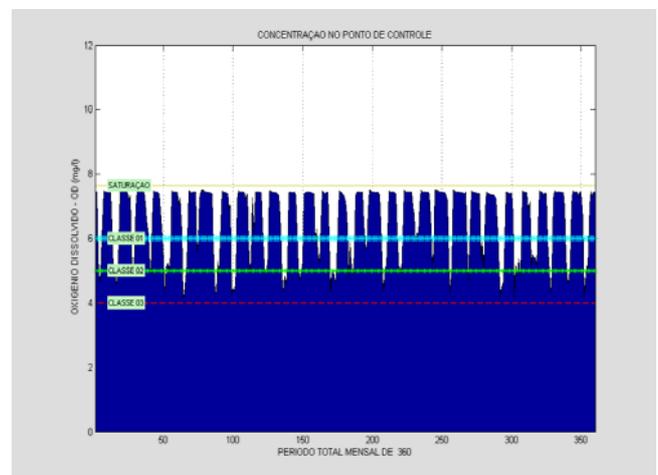


Figura 8 - Comportamento do OD no Ponto de Controle PC1.

Observa-se na Figura 9 que, em todos os meses do período simulado, a concentração do FT, mais diluída, foi minimizado ficando abaixo da meta estabelecida devido a um maior aporte de água vinda do reservatório Engenheiro Ávidos. Observa-se na Figura 10 que os níveis de clorofila-a ficaram abaixo do limite para Classe II (meta) no ponto de controle PC1.

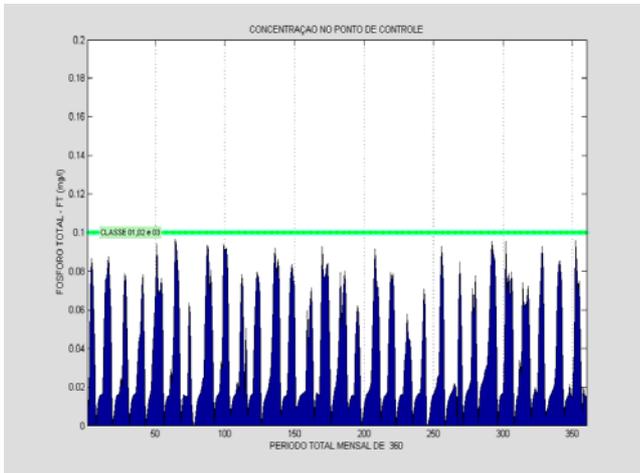


Figura 9 - Comportamento da FT no Ponto de Controle PC1.

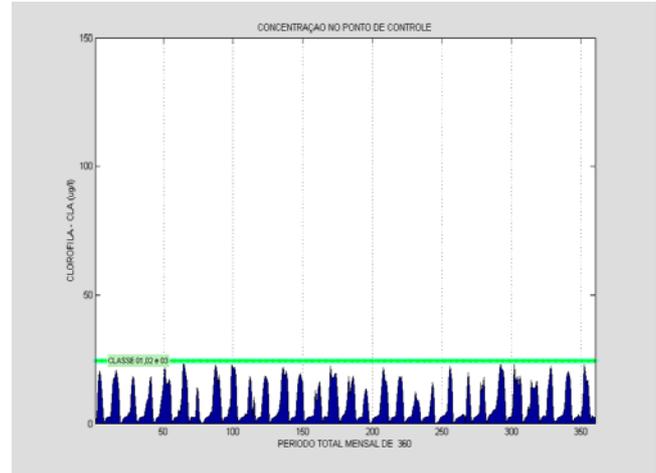


Figura 10 - Comportamento do CLA no Ponto de Controle PC1.

Com relação os níveis de concentrações do Nitrogênio Total (NT) e dos Coliformes Fecais ficaram dentro dos valores estabelecidos como meta no Ponto de Controle PC1.

O comportamento do volume armazenado no açude São Gonçalo apresentou uma grande variabilidade, característica de açudes de pequeno e médio portes, conforme pode ser observado na Figura 11. As restrições de volume meta, não foram violadas, atendendo as prioridades operacionais estabelecidas. Houve, também, a chegada de grandes vazões afluentes que provocaram perdas de água por vertimento. A retirada d'água pela descarga de fundo do reservatório, conforme mostrado na Figura 12, está dentro dos limites da descarga máxima permitida ao descarregador de fundo no mês devido a carga hidráulica.

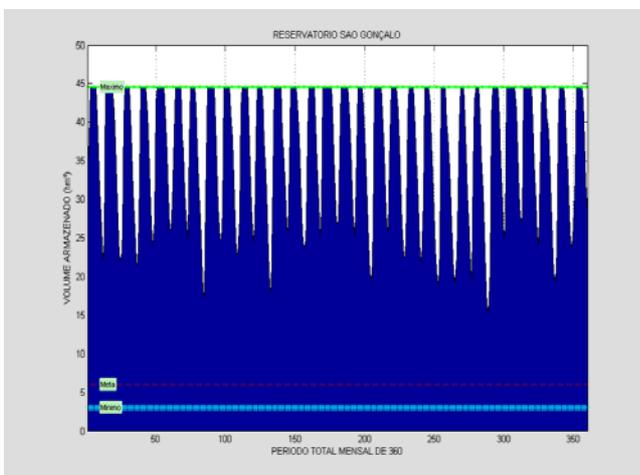


Figura 11 - Comportamento do volume armazenado do açude São Gonçalo.

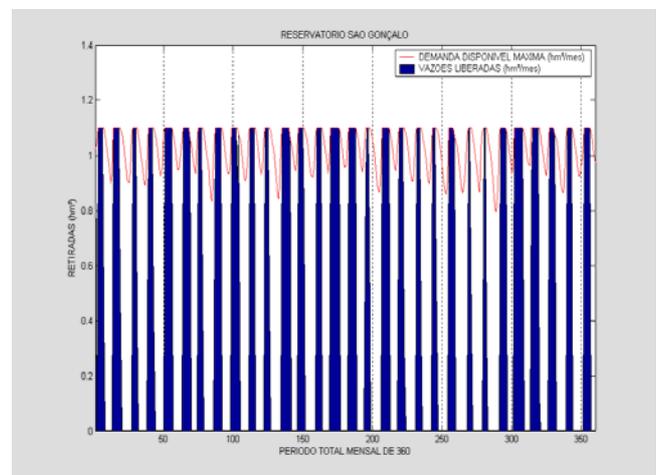


Figura 12 - Retiradas d'água pela descarga de fundo no açude São Gonçalo.

O açude São Gonçalo teve um desempenho satisfatório com relação à alocação de água para as demandas, com exceção ao atendimento das demandas para irrigação de culturas sazonais, que mostrou ter um baixo desempenho em comparação com a otimização de aspectos puramente volumétricos (quantitativa). Com relação ao atendimento do requerimento hídrico das culturas sazonais, elas possuem uma confiabilidade relativamente baixa, ficando, em média, 3 meses no processo de falha. A grande preocupação está no atendimento de seu requerimento hídrico que, quando em processo de falha, é, em média, de 6,85%. A razão deste desempenho está no alto requerimento de água para diluir as cargas poluentes lançadas no rio.

A Figura 11 apresenta comportamento do FT onde são observados que as suas concentrações foram minimizados e atenderam a meta estabelecida no reservatório São Gonçalo. Isso ocorreu devido ao açude São Gonçalo reter água para a diluição deste parâmetro. Os níveis de concentração de CLA, que está diretamente ligado à concentração do FT, comportaram da mesma forma, dentro meta estabelecida, conforme mostra a Figura 12.

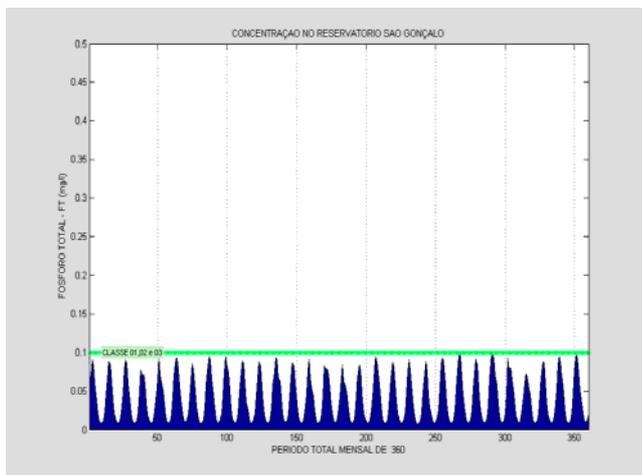


Figura 11 - Comportamento da FT no açude São Gonçalo.

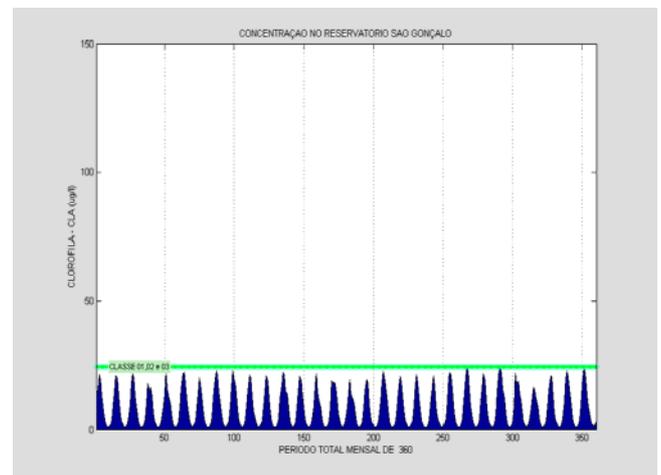


Figura 12 - Comportamento da CLA no açude São Gonçalo.

Os outros parâmetros de qualidade da água analisados atenderam a meta estabelecida para o reservatório São Gonçalo.

## 6.0 – CONCLUSÃO

Foram priorizadas, neste cenário de simulação, o atendimento às demandas de água e manutenção das concentrações de DBO, FT e OD no ponto de controle e o FT no reservatório de São Gonçalo dentro das metas de enquadramento para Classe II. Com relação ao reservatório Engenheiro Ávidos, foram atendidas todas as demandas de água, ou seja, apresentaram uma sustentabilidade de 100%. Os níveis de concentrações dos diferentes parâmetros de qualidade de água foram todos enquadrados na Classe II. Todas as restrições com relação ao balanço hídrico foram satisfeitas no Ponto de Controle PC1. Descargas do reservatório Engenheiro Ávidos ocorreram para minimizar os níveis das concentrações da DBO e FT no Ponto de Controle PC1 a fim de serem enquadrados na Classe II. Com relação aos níveis de concentração do OD, em alguns meses, o modelo não conseguiu maximizar os níveis de OD para atingir a meta estabelecida, apesar do reservatório Engenheiro Ávidos liberar mais água pelo descarregador de fundo todos os meses.

O reservatório de São Gonçalo conseguiu atender quase todas as suas demandas quantitativas, ficando sem atender as demandas para irrigação das culturas sazonais. Esta apresentou uma confiabilidade de 61,94%, ficando em média 3 meses em processo de falha e só conseguiu atender, em média, 6,85% dessas demandas quando entrava num processo de falha, atingindo uma sustentabilidade 1,33%. No entanto, os níveis de concentrações do FT foram minimizados e enquadrados na Classe II. Para atingir esse objetivo de diluir o FT a fim de atender a meta estabelecida foi mantida água no reservatório São Gonçalo. O aumento da vazão no Ponto de Controle PC1 e do volume da água no reservatório São Gonçalo geraram um aumento da vulnerabilidade, diminuindo o índice de sustentabilidade, das culturas sazonais.

## REFERÊNCIAS

### a) Livros

GOMES, H. P. (1999). *Engenharia de Irrigação: Hidráulica dos Sistemas Pressurizados, Aspersão e Gotejamento*; Editora da UFCG Campina Grande - PB, 3º ed., 412 p.  
VON SPERLING, M. (1996); *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte – MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, Volume 01, 2º ed., p. 243.

### b) Teses e Dissertações

LARENTIS, D. G. (2004) *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. .  
RIBEIRO, M. M. R. (1990). *Operação de um sistema de reservatórios para usos de conservação*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. (1990).  
SANTOS, V. S. (2007). *Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos*. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Dissertação de Mestrado. 144p.  
VIEIRA, A. S. (2011). *Modelo de Simulação Quali-Quantitativo Multiobjetivo para o Planejamento Integrado dos Sistemas de Recursos Hídricos*. Campina Grande: UFCG – Pós-graduação em Recursos Naturais. Tese de Doutorado. 275p.

### c) Artigos em revista

WURBS, R. A., (2005). *Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models*. Technical Report nº 282. Texas Water Resources Institute.

### d) Material Técnico

DAEE; (2005). *Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas*. São Paulo. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. 116p.  
SCIENTEC. (1997). Associação para o desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Paraíba: Bacia do Piancó e do Alto Piranhas*. SEPLAN.  
SUDENE. (1990). *Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado da Paraíba*. Série pluviométrica 5. Recife-PE, Brasil. (1990).