



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR

UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

FAGNER FRANÇA DA COSTA

**METODOLOGIA MULTI OBJETIVO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA
UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO:
O CASO DO RESERVATÓRIO GRAMAME-MAMUABA**

POMBAL – PB

2014

FAGNER FRANÇA DA COSTA

**METODOLOGIA MULTI OBJETIVO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA
UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO:
O CASO DO RESERVATÓRIO GRAMAME-MAMUABA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Érica Cristine Medeiros Nobre Machado.

POMBAL – PB

2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA SETORIAL
CAMPUS POMBAL/CCTA/UFCG

MON
C837m

Costa, Fagner França da.

Metodologia multiobjetivo de alocação de água utilizando algoritmo genético: o caso do reservatório Gramame-Mamuaba / Fagner França da Costa. - Pombal, 2014.

42 fls.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2014.

"Orientação: Profª. Drª. Érica Cristine Medeiros Nobre Machado".

Referências.

1. Recursos Hídricos - Gestão. 2. Alocação de Água. 3. Reservatórios de Água.
I. Machado, Érica Cristine Medeiros Nobre. II. Título.

UFCG/CCTA

CDU 556.18

FAGNER FRANÇA DA COSTA

**METODOLOGIA MULTI OBJETIVO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA
UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO:
O CASO DO RESERVATÓRIO GRAMAME-MAMUABA**

Aprovado em _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Érica Cristine Medeiros Nobre Machado (UFCG/CCTA)
Orientadora

Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias (UFCG/CCTA)
Examinador interno

Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos (UFCG/CCJS)
Examinador externo

Dedico este trabalho em memória ao meu primo Kelson, que hoje descansa em paz a direita de Deus pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter me guiado até a realização desse sonho;

À minha mãe Margarida e ao meu pai Martinho, pelo apoio e incentivo nos momentos de dificuldades;

Aos meus irmãos por tudo que fizeram por mim, sempre do meu lado incondicionalmente;

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo;

Aos professores da Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - Campus de Pombal pelos conhecimentos transmitidos;

A Prof^a. Dr^a. Érica Machado pela sua paciência, amizade, confiança e orientação na realização deste trabalho;

Ao professor Alexandre Paiva, pela oportunidade que me deste em adentrar na iniciação científica;

Aos meus colegas da turma 2009.2 de Engenharia Ambiental pelo convívio, brigas, lições e amizades durante esses cinco anos que passamos juntos;

Enfim, a todos, que de maneira direta ou indireta contribuíram na minha formação e na realização deste sonho, o meu muito obrigado.

RESUMO

O modelo é uma representação do sistema real. O uso de modelos matemáticos, ferramentas computacionais e metodologias para atividades de planejamento e gestão da água, com a finalidade de auxiliar na tomada de decisão, são cada vez mais comuns. Geralmente, esses sistemas utilizam uma variedade de modelos de otimização e hidrológica, hidrogeológica e simulação de qualidade da água. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia multiobjetivo para auxiliar no processo de decisão para alocação de água em reservatórios, com estudo de caso no reservatório Gramame-Manuaba, localizado no estado da Paraíba. Para este estudo, foi utilizado o método ϵ -*constraint method* com a técnica de elitismo associado a um algoritmo genético, tendo em conta as restrições sobre a operação do reservatório. Os experimentos foram realizados no software MATLAB® 2012a, demonstrando a eficácia da metodologia desenvolvida como o sistema de apoio à decisão de processos de alocação de água para a concessão.

Palavras-chave: Otimização multiobjetivo, Sistema de suporte à decisão, Gestão dos recursos hídricos

ABSTRACT

Model is a representation of the real system. The use of mathematical models, computational tools and methodologies for planning and water management activities, with the purpose of assisting in decision making, are increasingly common. Generally, these systems use a variety of optimization models and hydrological, hydrogeological and water quality simulation. In this context, this work aimed to develop a multiobjective methodology to assist in the decision process for allocation of water in reservoirs, with case study in the reservoir Gramame-Manuaba, located in the state of Paraíba. For this study, the ϵ -constraint method with the technique of elitism associated with a genetic algorithm, taking into account the restrictions on the operation of the reservoir were used. The experiments were performed in MATLAB® 2012a, demonstrating the effectiveness of the developed methodology as the decision support system of water allocation processes for the grant.

Keywords: Multiobjective optimization, Decision support system, Water resources management.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fluxograma representativo do algoritmo	23
FIGURA 2 – Representação da solução	24
FIGURA 3 – Localização da área de estudo	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Métodos clássicos para otimização multiobjetivo	17
TABELA 2 – Dados cota x volume do reservatório	29
TABELA 3 – Evaporação média mensal no reservatório.....	29
TABELA 4 – Vazão requerida por cada usuário	30
TABELA 5 – Vazões Q_{90} anuais.....	30
TABELA 6 – Vazões Q_{90} do período seco e chuvoso	30
TABELA 7 – Vazões Q_{90} mensais.....	30
TABELA 8 – Alocação de água para cada usuário, em % da vazão requerida (Cenário1)	31
TABELA 9 – Alocação de água para cada usuário, em % da vazão requerida (Cenário 2)	32
TABELA 10 – Alocação de água para cada usuário, em % da vazão requerida (Cenário 3)	33

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AGs – Algoritmos genéticos

dat – é a demanda atendida no mês

drt – é a demanda requerida no mês

m – é o número do mês da alocação

nm – é o número de meses

$pbcm$ é a probabilidade do crossover média

PL – Programação linear

PNL – Programação não linear

SSD – Sistemas de suporte à decisão

u – é o usuário envolvido na alocação

$Va_{u,m}$ – é o volume alocado para cada usuário no mês

$Va_{u,m(filho)}$ – é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo filho

$Va_{u,m(pai1)}$ – é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo pai 1

$Va_{u,m(pai2)}$ – é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo pai 2

xcm – é número aleatório gerado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Geral	14
1.1.2 Específicos	14
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO	15
2.1 Alocação de água no contexto da Política Nacional de Recursos Hídricos	15
2.2 Princípios da otimização multiobjetivo	16
2.3 Algoritmos genéticos.....	18
2.4 Aplicação de algoritmo genético no gerenciamento de recursos hídricos.....	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Modelo de otimização proposto	22
3.1.1 Geração da população inicial	23
3.1.2 Avaliação da aptidão	24
3.1.3 Operador de seleção	25
3.1.4 Operadores de reprodução	26
3.1.5 Critério de parada do algoritmo	27
3.2 Planejamentos dos experimentos	27
3.2.1 Descrição da área de estudo	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 Valor único para a vazão de referência Q_{90} (Cenário 1)	31
4.2 Valores sazonais de vazão de referência Q_{90} (Cenário 2).....	32
4.3 Valores mensais de vazão de referência Q_{90} (Cenário 3)	32

5 CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS	35
ANEXO	41

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico verificados nas últimas décadas têm tornado a água um recurso cada vez mais precioso, escasso e disputado em praticamente em todo o mundo, haja vista que, a água é um bem natural e essencial ao ser humano, ao desenvolvimento econômico, e colabora para a preservação do meio ambiente (MOREIRA, 2001).

Os conflitos pelo uso dos recursos hídricos podem ocorrer, dentre outros, entre usuários de mesma categoria, entre usos distintos, entre uso produtivo e gestão ambiental ou entre unidades diferentes (CORDEIRO NETO, 2005). Os conflitos gerados devido à escassez da água, denominados Conflitos de 1ª ordem, são os mais comuns. Mas, existem ainda os conflitos resultantes de medidas e ações da gestão hídrica quando não bem planejadas ou executadas, denominados Conflitos de 2ª ordem. Isso ocorre porque o processo de gestão hídrica é muito complexo, exigindo uma abordagem interdisciplinar e o envolvimento de diversos atores para o atendimento de múltiplos objetivos, entre eles, a minimização dos conflitos e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Em situações extremas de conflitos pode ser necessária a intervenção dos órgãos gestores e a negociação entre os usuários, no sentido de promover uma repactuação da outorga, como ocorreu na bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, que culminou na definição do Marco Regulatório para a gestão do sistema Curema-Açu, que estabelece os quantitativos a serem outorgados em função de critérios de eficiência pré-estabelecidos (BRAGA et al., 2004).

Para auxiliar no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente na gestão de bacias hidrográficas que apresentam múltiplos e conflitantes usos, é comum o uso de Sistemas de Suporte a Decisão (SSD), que é uma metodologia auxiliadora nas tomadas de decisão caracterizadas por um conjunto de dados e modelos matemáticos.

O reservatório Gramame-Mamuaba, é considerado estratégico no estado da Paraíba, pois é responsável por 70% da demanda (abastecimento humano e industrial) da região metropolitana de João Pessoa (SEMARH, 2000). Atualmente, vivencia problemas de conflitos devido às solicitações de aumento de outorgas, como foi constatado por Felinto (2013) em estudo sobre a oferta e demanda hídrica na Bacia do rio Gramame.

Em tais situações, o planejamento integrado eficiente e racional da alocação das disponibilidades hídricas entre os seus múltiplos usos, e métodos de otimização que auxiliem a tomada de decisão na negociação, estão entre os instrumentos mais apropriados para efetuar tais análises (SANTOS et al., 2011).

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Desenvolver uma metodologia multiobjetivo para alocação de água em reservatórios, com o propósito de auxiliar em processos decisórios de negociação da outorga.

1.1.2 Específicos

- Caracterizar os principais usuários do reservatório Gramame-Mamuaba, quantificando suas demandas de água;
- Estimar a disponibilidade hídrica para outorga no reservatório, considerando critérios legais e critérios usuais adotados pelo órgão gestor das águas da Paraíba;
- Inserir adaptações e técnicas específicas em uma metodologia multiobjetivo, de forma a tornar a otimização mais eficiente e eficaz;
- Aplicar a metodologia desenvolvida para alocação das águas do reservatório Gramame-Mamuaba e, cenários distintos e analisar os resultados.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Alocação de água no contexto da Política Nacional de Recursos Hídricos

Alocação de água pode ser definida como um processo pelo qual os recursos hídricos disponíveis no planeta terra são distribuídos para garantir os direitos de uso da água pelo os seres vivos (ROCQUE JR., ARTHUR J., 2000). Segundo WWF (2006), em virtude da expansão e mudanças nas demandas, a alocação e preservação dos recursos hídricos é um grande desafio a ser enfrentado pela humanidade.

No Brasil a Política Nacional de Recursos Hídricos foi instituída através da Lei Federal nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997. Tal política apresenta, como um dos seus fundamentos, a consideração da água com um bem de domínio público, tendo seu uso, portanto, condicionado a uma outorga emitida pelo órgão que possui a devida competência legal. Considerada, portanto, um instrumento de gestão previstos na referida lei (art. 5º, III), a outorga é tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso a ela. Na prática, a outorga é o ato administrativo que dá a concessão legal de certo volume ou vazão de água, durante certo tempo e sujeito a algumas regras e restrições (COSTA e CAMPOS, 2005), ou seja, a outorga é o dispositivo legal que oficializa a alocação das águas da bacia hidrográfica.

O planejamento do uso das águas dos mananciais existentes pode proporcionar um melhor aproveitamento, controle e conservação de suas águas, porém, o grande desafio deste planejamento está em ser capaz de atender as demandas dos múltiplos usos de forma integrada e otimizada para todo o sistema, sem, contudo ferir os preceitos legais. A sustentabilidade hídrica do sistema depende deste planejamento integrado eficiente e racional da alocação ou realocação das disponibilidades hídricas entre os seus múltiplos usos. Métodos de otimização estão entre os instrumentos mais apropriados para efetuar tais análises (SANTOS et al., 2011).

A alocação das águas principalmente em bacias hidrográficas, como há múltiplos critérios (legais e técnicos, por exemplo) e múltiplos objetivos (minimização de conflitos e preservação do recurso hídrico, por exemplo), é adequado a utilização

de modelos de otimização com múltiplos objetivos, dentre os quais, os Algoritmos Genéticos (GOLDBERG, 1989), têm se destacado.

2.2 Princípios da otimização multiobjetivo

Otimização consiste na busca da melhor solução possível em um espaço de busca, ou seja, maximizar ou minimizar uma ou mais funções objetivo respeitando suas limitações e restrições (MACHADO, 2006).

Os modelos de otimização podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos (BRAVO, 2005).

Os modelos de otimização determinísticos utilizam como variáveis de entrada as séries históricas, ou seja, dados observados. Devido ao aspecto estocástico do sistema, os métodos de otimização determinística não podem prover soluções ótimas ou não podem estimar a confiabilidade das soluções propostas (KOUTSOYIANNIS, D.; ESTRATIADIS, A. e KARAVOKIROS, G., 2002).

Por outro lado, os modelos estocásticos de otimização implícita utilizam como variáveis de entrada séries de vazões afluentes geradas de forma sintética, resultando em soluções satisfatórias (LABADIE, 2004).

Dentro das técnicas mais utilizadas na otimização estocástica implícita se encontra a programação linear (PL). A Programação Linear é representada por funções lineares, e normalmente não são aplicáveis em problemas práticos de engenharia devido à dificuldade em representar processos complexos através de funções lineares.

A programação não linear (PNL) se apresenta como uma ferramenta mais adequada quando não é possível linearizar as funções que intervêm no problema de otimização, ou quando o processo de linearização leva a grandes simplificações do modelo. A PNL é bastante utilizada na engenharia, como por exemplo, no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, tendo em vista que, a maioria dos problemas relacionados a gestão das águas, são representadas por funções não lineares (TRIGUEIRO, 2014).

Atualmente, uma das técnicas mais utilizadas nos problemas de otimização de recursos hídricos é a programação dinâmica (PD). Ela explora de forma efetiva a estrutura seqüencial de decisão dos problemas de otimização de operação de reservatórios (LABADIE, 2004).

Quando o problema a ser resolvido envolve múltiplos objetivos para serem atendido, a formulação utilizada para adaptar esses métodos a uma otimização multiobjetivo pode ser de várias maneiras, podendo ser destacados os métodos clássicos e os métodos evolucionários. Os métodos clássicos, a exemplo dos apresentados na TAB. 1, geralmente evitam a complexidade envolvida em um problema multiobjetivo convertendo os vários objetivos em uma única função objetivo (MACHADO, 2006).

TABELA 1 – Métodos clássicos para otimização multiobjetivo

Método	Característica
<i>Weighted-sum method</i>	É o método mais simples, onde o usuário fornece um conjunto de pesos e fatores para cada objetivo considerado.
<i>ϵ-constraint method</i>	O objetivo mais importante é otimizado através de uma função objetivo simples e os demais objetivos são adicionados em forma de restrições à otimização.
<i>Weighted metric method</i>	A característica principal é a otimização de todos os objetivos independentemente.
<i>Goal programming method</i>	A idéia principal é encontrar soluções que atinjam uma meta pré definida para uma função ou conjunto de funções objetivo.

Fonte: Deb, (2001) apud Machado, (2006).

Dentre os métodos evolucionários destacam-se os algoritmos evolutivos, que se baseiam na teoria da evolução dos seres vivos descrita por Charles Darwin, onde apenas os melhores sobrevivem para a geração seguinte e que tem como um dos seus principais representantes os Algoritmos Genéticos (GOLDBERG, 1989).

A modelagem de problemas reais de otimização geralmente também requer a definição de funções que delimitem o espaço de busca viáveis (factíveis) do cenário otimizado, ou seja, que impõe limite nos parâmetros analisados, e denominadas funções de restrições. Dentre as estratégias para consideração das restrições em problemas de otimização destacam-se (MACHADO, 2011): a utilização de funções de penalidades das restrições, que são proporcionais às restrições violadas e devem ser adicionadas a cada valor de função objetivo, em problemas de minimização, ou subtraídas, em problemas de maximização; a penalidade de morte, que é o descarte de qualquer solução inactível; o reparo, através de um procedimento randômico ou

de uma estratégia de reparo específico, com procedimentos particulares para cada tipo de restrição do problema, tornando-a ou aproximando-a de uma solução viável.

2.3 Algoritmos genéticos

Valory (2013, p. 42) define algoritmo genético, como sendo:

Uma técnica populacional estocástica de otimização por busca direta inspirado nos mecanismos de evolução das espécies, que compreendem processos da genética das populações, sobrevivência e adaptação dos indivíduos.

Os algoritmos genéticos destacam-se devido a sua natureza robusta, obtida pela associação das características de eficácia e eficiência. Nesse contexto, a eficiência de um método de otimização está relacionada à sua velocidade de convergência, ou seja, à sua capacidade de encontrar boas soluções em um curto espaço de tempo. Enquanto que a eficácia está associada à confiabilidade da convergência, ou seja, na capacidade de encontrar o ótimo global do problema.

Ressalta-se ainda, em tais algoritmos, a facilidade de incorporação nos seus operadores, de duas técnicas necessárias para melhorar o desempenho de qualquer método de otimização: a técnica de *exploration*, que consiste em explorar pontos distintos no espaço de busca, e a técnica de *exploitation*, que consiste em utilizar as informações presentes nas soluções já encontradas para guiar a busca.

Diversos autores têm verificado algumas vantagens e desvantagens na utilização de algoritmos genéticos (GOLDBERG, 1989; LACERDA e CARVALHO, 1999; REIS e AKUTSU, 2002; FRANCA ALENCAR, 2003; CARRIJO, 2004 apud MACHADO, 2006).

Vantagens:

- Trabalham com uma codificação do parâmetro e não com o próprio parâmetro;
- Realizam buscas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Utilizam apenas informações da função objetivo, não requerendo o uso de derivadas ou outro conhecimento auxiliar;

- Utilizam regras de transição probabilísticas ao invés de determinísticas;
- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou uma combinação deles;
 - Não necessitam de um conhecimento matemático aprofundado sobre o problema;
 - Otimizam um número grande de variáveis;
 - Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
 - Adaptam-se bem a computadores paralelos;
 - Fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
 - São fáceis de serem implementados em computadores;
 - Possuem flexibilidade quanto aos tipos de função objetivo;
 - São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
 - Podem ser hibridizados com outras técnicas de otimização.

Desvantagens:

- Convergência relativamente lenta em relação às outras técnicas;
- Encontra rapidamente a região do espaço que contém o ótimo global, mas tem dificuldades para refinar essa região e definir o ótimo global;
 - Não possui uma utilização padronizada, pois os usuários podem explorar os conceitos envolvidos de maneira diferente;
 - Requerem que as restrições sejam introduzidas na função objetivo sob a forma de penalidades.

Os procedimentos básicos comuns à implementação de qualquer algoritmo genético são: 1) escolha da sistemática de representação cromossomial; 2) definição da função de avaliação das soluções; 3) especificação dos operadores genéticos para os mecanismos de seleção e reprodução.

O cromossomo é considerado um dos principais componentes da composição de um AG. Ele é responsável pelo armazenamento das informações que serão avaliados quanto a sua função de avaliação (*fitness*). Vale salientar que cada

pedaço desta representação, denomina-se de gene, em analogia ao cromossomo biológico (LINDEN, 2012). Cada solução possível para o problema a ser otimizado, cada cromossomo, pode ser representado na forma binária (cadeia de bits) ou real (números reais).

A função de avaliação é a maneira utilizada pelos algoritmos genéticos para se determinar a qualidade dos indivíduos gerados. O funcionamento é bem simples, cada um dos cromossomos é submetido a esta função, quando todos os indivíduos da população forem avaliados pode-se comparar qual deles possui o melhor resultado. Esta informação do melhor resultado é utilizado para aumentar a probabilidade da geração seguinte possuírem cromossomos semelhantes. No final da última geração, o indivíduo que possuir o melhor *fitness*, é considerado como o melhor resultado da otimização (MOEDINGER, 2005).

Quanto ao operador de seleção existem várias técnicas descritas na literatura, dentre elas podemos destacar o operador da roleta viciada, na qual cada cromossomo é atribuído uma probabilidade de se passar para a nova geração, onde esta probabilidade estar diretamente associada a sua aptidão, ou seja, quanto maior suas aptidões maiores serão as probabilidades do indivíduo de ser selecionado. Outro operador bastante utilizado na literatura é o de torneio, no qual um grupo de indivíduos são selecionados de forma aleatória na população com a mesma probabilidade, para participar de uma competição, sendo o vencedor aquele que obtiver o melhor "*fitness*" (JOHN HOLLAND, 1975; LACERDA E CARVALHO, 1999 apud VALORY, 2013).

Dentre os operadores de reprodução estão os de recombinação (*crossover*) e os de mutação. Para o caso de se utilizar a representação cromossomial real, os operadores convencionais de recombinação de N pontos e uniforme, adaptados dos operadores utilizados na codificação binária, não oferecem bons resultados, pois consistem basicamente na troca dos valores dos genes, sem criar nenhuma informação nova. Assim, quando as variáveis de solução são representadas por números inteiros ou reais, se recomenda a utilização de operadores aritméticos. (MICHALEWICZ, 1994 apud LACERDA e CARVALHO, 1999), desenvolveu vários operadores para a representação real, dentre eles, o *crossover* aritmético, *crossover* heurístico, *crossover* simples, mutação uniforme, mutação limite, mutação não uniforme, dentre outros.

2.4 Aplicação de algoritmo genético no gerenciamento de recursos hídricos

A utilização de ferramentas computacionais e metodologias com o propósito de auxiliar no processo de análise, definição e gerenciamento das outorgas são cada vez mais comuns. Geralmente estes sistemas utilizam uma variedade de modelos de otimização e de simulação hidrológica, hidrogeológica e de qualidade de água. Entre as recomendações para projeto, concepção e implementação de novos sistemas de suporte à decisão para outorga estão o tratamento adequado das questões de qualidade da água, a ampliação e melhoria da base de informações para outorga de águas subterrâneas e a modelagem adequada dos sistemas de reservatórios (BALTAR et al., 2003).

Segundo CELESTE, A. B.; SUZUKI, K. e KADOTA, A. (2003), em estudo sobre a operação ótima de sistemas de recursos hídricos em tempo real, a busca pela solução ótima por meio da utilização de AGs pode auxiliar no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, especialmente em problemas complexos que envolvem um grande número de variáveis e restrições.

VALORY, J. P. L.; FRAUCHES, V. G. L.; REIS, J. A. T. e MENDONÇA, A. S. F. (2013), em estudo sobre aplicação combinada de técnicas de otimização e de modelagem de água no processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos, constataram que a utilização da utilizando AGs apresentam bons resultados quando analisados problemas muito complexos, que poderiam demandar tempos de processamento, considerados inviáveis.

BARBALHO, F. D. e FORMIGA, K. T. M. (2009) utilizando algoritmos genéticos na operação de sistemas de reservatórios, concluiu que AGs associado a um sistema de simulação promove regras eficientes, além disso, a flexibilidade do modelo na incorporação de outras funções objetivas torna a rotina aplicável em outros modelos que simulam a operação de reservatórios.

Diversos autores (SANTOS, 2009; MACHADO, 2011; MACHADO, 2006) utilizando otimização multiobjetivo verificaram que a utilização de algoritmos genéticos permite estabelecer regras operacionais ótimas e quantificar o impacto destas regras ao longo prazo para cada cenário analisado.

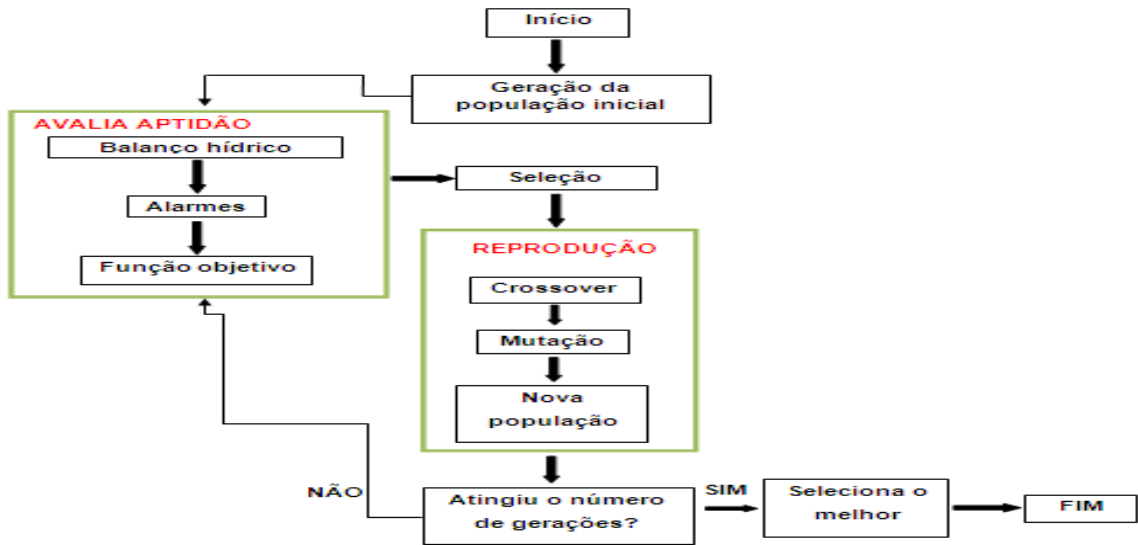
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Modelo de otimização proposto

Neste trabalho foi utilizado um algoritmo genético e os princípios do ϵ *constraint method*, ou seja, foi utilizada uma única função objetivo, com o propósito de maximizar o atendimento da vazão requerida, e os demais objetivos, os quais buscam uma melhor eficiência na operação do reservatório, foram adicionados como restrições da otimização. As soluções foram categorizadas em viáveis e inviáveis, conforme o atendimento ou não das restrições de otimização. As soluções inviáveis são avaliadas, além da função objetivo, pelas informações do tipo e severidade da restrição violada, sendo essas informações utilizadas posteriormente no processo de seleção dos indivíduos, conforme sugerido por Brasileiro (2005) e Machado (2006).

Na FIG. 1 são apresentadas as etapas metodológicas desenvolvidas para a otimização do problema de alocação de água em reservatórios. Em síntese, a metodologia se inicia a partir de uma população (100 indivíduos) gerada de forma aleatória, as quais variam entre si na proporção de atendimento da vazão requerida. Em seguida os indivíduos dessa população têm sua aptidão avaliada (*fitness*), por meio da função objetivo, e da verificação da violação dos alarmes de operação do reservatório (restrições), o que requer a execução de um modelo de balanço hídrico do reservatório. Após a avaliação da aptidão dos indivíduos o operador de seleção seleciona os cromossomos mais aptos para seguirem para os operadores de reprodução, considerando, nesta seleção, a aptidão avaliada, que se baseia tanto no atendimento da vazão requerida quanto na violação dos alarmes de operação. Na reprodução, os pares de pais selecionados cruzam entre si, a partir de um ponto de corte, por meio do operador de *crossover* (70% de probabilidade), para, em seguida, serem submetidos ao operador de *mutação* (30% de probabilidade), para a geração de um descendente. Quando todos os descendentes da nova geração são gerados, caso o critério de parada não seja atendido (50 gerações), o algoritmo retorna para a etapa de avaliação da aptidão. Uma vez atendido o critério de parada do algoritmo, da população final é selecionado o melhor cromossomo, considerado resultados da otimização e solução para o problema.

FIGURA 1 – Fluxograma representativo do algoritmo



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

3.1.1 Geração da população inicial

A solução de alocação foi representada, através de números reais, em uma matriz bidimensional (tempo x usuário) contendo 12 colunas, e 7 linhas, conforme descrito na FIG. 2.

No início da otimização, a população inicial é gerada de forma aleatória, na qual, cada volume requerido pelo usuário em cada mês foi multiplicada por um número aleatório, que varia entre 0 e 1. Ou seja, cada solução da otimização, cada indivíduo, representa proporções diferentes do volume alocado, tendo como valor máximo o valor requerido.

FIGURA 2 – Representação da solução

	m1	m2	m3	...	m12
u ₁	V _{a1,1}	V _{a1,2}	V _{a1,3}	...	V _{a1,n}
u ₂	V _{a2,1}	V _{a2,2}	V _{a2,3}	...	V _{a2,n}
...
u ₇	V _{a_{nu},1}	V _{a_{nu},2}	V _{a_{nu},3}	...	V _{a_{nu},n}

m é o número do mês da alocação

u é o usuário envolvido na alocação

$V_{a_{u,m}}$ é o volume alocado para o usuário no mês

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

3.1.2 Avaliação da aptidão

A avaliação da aptidão inicia com a execução do balanço hídrico do reservatório para cada solução avaliada. No balanço hídrico foi considerado um modelo simplificado de operação no reservatório, considerando como entrada no sistema as vazões afluentes (de acordo com os três cenários definidos de vazão de referência); e, como saídas, a evaporação, a demanda atendida e o volume extravasado do reservatório (vertimento), quando ocorre. Ademais, considera-se ainda que uma vez que o alarme de nível do reservatório é atingido (40% do nível máximo), a vazão libera pelo reservatório é reduzido pela metade, ou seja, comprometendo o atendimento a demanda. Vale salientar que, para o volume inicial do reservatório foi adotado 50% do seu volume máximo.

Uma vez executado o balanço hídrico é possível a ocorrência de alarmes, ou seja, verificar o atendimento das restrições de operação do reservatório, tendo em vista que, em bacias hidrográficas, dotados de grandes reservatórios, muito comum em regiões semi áridas, o foco principal do órgão gestor é a operação do reservatório. Neste estudo foram adotadas as restrições sugeridas por Machado (2011), que estão relacionadas à operação do reservatório, conforme descrição:

• **Sustentabilidade da operação no reservatório:** Definida através da comparação entre o nível final e o inicial do reservatório. Soluções cujo nível final do reservatório seja menor do que 90% do inicial são consideradas inviáveis.

• **Nível de reserva no reservatório:** Manutenção de um nível de reserva no reservatório para absorver as incertezas envolvidas e garantir os usos prioritários. Soluções que violem esse volume de reserva (adotado como 40% do volume útil) são consideradas inviáveis.

Quanto à função objetivo, alguns pesquisadores têm sugerido funções com o propósito de minimizar a diferença entre o valor requerido pelo usuário e o valor alocado (BHAKTIKUL et al., 2007; WANG et al., 2009). Dessa forma foi utilizada uma função objetivo com propósito similar, a qual esta descrita na equação 1.

$$MAX \frac{\sum_{i=1}^{nm} (dat)}{nm} \quad (1)$$

Onde:

dat é a demanda atendida no mês;

drt é a demanda requerida no mês;

nm é o número de meses.

3.1.3 Operador de seleção

Foi utilizado o operador de torneio (MITCHELL, 1997), com a incorporação do conceito de viabilidade, da seguinte forma: 1) entre um indivíduo viável e um inviável, seleciona-se o indivíduo viável; 2) entre dois indivíduos viáveis, seleciona-se aquele de maior função objetivo; e 3) entre dois indivíduos inviáveis, seleciona-se aquele em que o ponto de falha (mês de violação da primeira restrição) está mais próximo do final do horizonte de operação e, caso ocorra empate, seleciona-se o indivíduo de maior função objetivo.

3.1.4 Operadores de reprodução

Inicialmente os pares de pais selecionados são submetidos ao operador de *crossover média* (DAVIS, 1991 apud LACERDA e CARVALHO, 1999). Neste operador cada gene do filho gerado é obtido através da média aritmética dos respectivos genes dos indivíduos pais. Ressalte-se que esta operação apenas será aplicada caso seja satisfeita a probabilidade definida para este operador, caso contrário, o filho da reprodução será tomado como uma réplica do melhor entre os dois pais, considerando-se os mesmos critérios do operador por torneio na definição do melhor. A equação 2 mostra a operação de geração do indivíduo filho quando a probabilidade é atendida ($xcm \leq pbcm$).

$$Va_{u,m}(\text{filho}) = \frac{Va_{u,m}(\text{pai1}) + Va_{u,m}(\text{pai2})}{2} \quad (2)$$

Onde:

xcm é número aleatório gerado, contido no intervalo $[0,100]$, para verificação da aplicação do *crossover média*;

$pbcm$ é a probabilidade do *crossover média*;

$Va_{u,m}(\text{filho})$ é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo filho;

$Va_{u,m}(\text{pai1})$ é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo pai 1;

$Va_{u,m}(\text{pai2})$ é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo pai 2.

Assim como no operador de *crossover* a mutação uniforme (LACERDA e CARVALHO, 1999) age também restrito a uma probabilidade de aplicação ($pbmu$), sendo que, quando a mesma não é satisfeita, os genes do indivíduo filho referentes aos volumes alocados permanecem inalterados. Caso contrário, quando $xmu > pbmu$, os genes do indivíduo filho são substituídos pelos genes correspondentes de um indivíduo gerado aleatoriamente. Este procedimento é aplicado a cada filho do *crossover*.

3.1.5 Critério de parada do algoritmo

Para a finalização do algoritmo, foi definido como critério de parada um número de gerações de forma a garantir o potencial de busca do algoritmo, resultando numa solução satisfatória (KOZA, 1992), adotado neste estudo em 50 gerações.

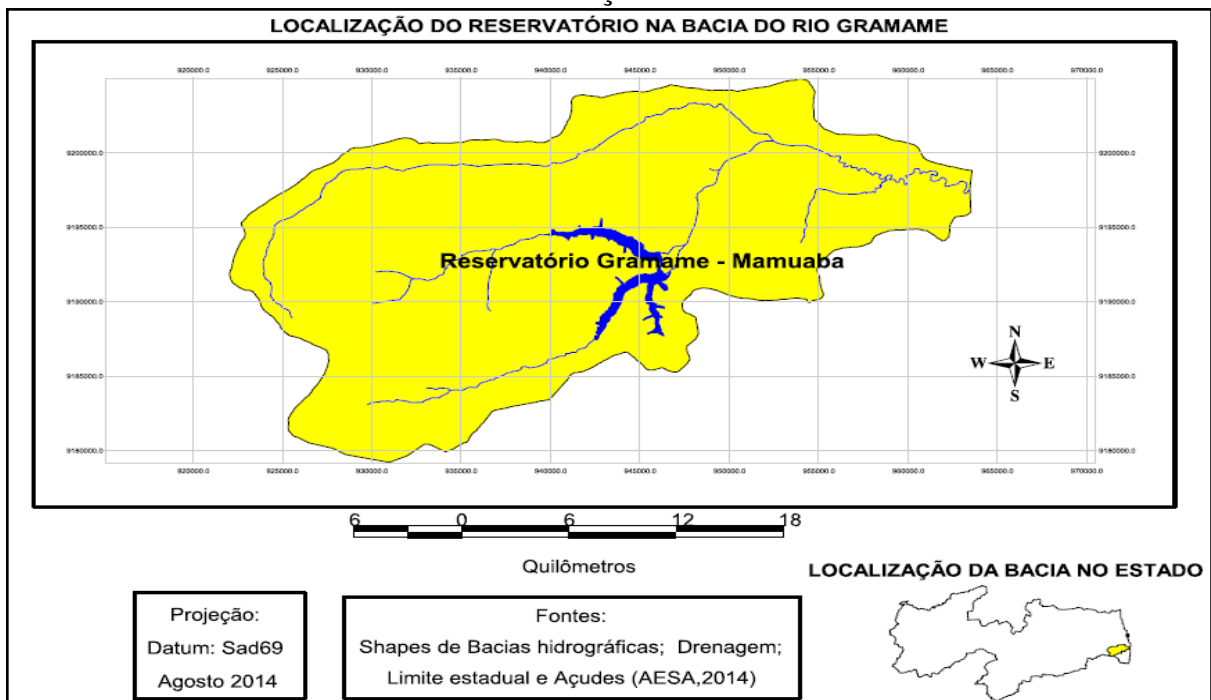
3.2 Planejamentos dos experimentos

A metodologia foi implementada no software MatLab[®] 2012a e os experimentos foram realizados em cinco execuções para cada cenário de definição da vazão de referência, conformes TAB. 5, TAB. 6 e TAB. 7, totalizando 15 execuções. Adicionalmente foi utilizado o software Excel para interpretação dos dados e desenvolvimento de gráficos e tabelas.

3.2.1 Descrição da área de estudo

O trabalho foi realizado no sistema de reservatórios Gramame-Mamuaba, na qual está inserido na bacia hidrográfica do rio Gramame, localizada na região litorânea sul do Estado da Paraíba, próxima à capital João Pessoa, entre as latitudes 7°11' e 7°23' Sul, e as longitudes 34°48' e 35°10' Oeste, abrangendo os municípios de Alhandra, Conde, Crus do Espírito Santo, João Pessoa, Pedras de Fogo, Santa Rita e São Miguel de Taipu (MACHADO, 2003 apud NUNES, 2012). A bacia apresenta períodos de chuvas, que compreendem os meses de março a agosto, máxima pluviométrica entre junho e julho (precipitação média de 221,1 mm/mês), e período seco, entre setembro e fevereiro, com mínima pluviométrica entre outubro e novembro (44,9 mm/mês) (ABRAHÃO, 2006) (FIG. 3).

FIGURA 3 – Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O reservatório Gramame-Mamuaba, é constituído de duas barragens, uma no rio Gramame e outra no rio Mamuaba. As duas barragens se comunicam através de um canal cujas cotas da soleira são respectivamente, 28,59 m no açude Gramame e 28,61 m no açude Mamuaba. No açude de Gramame, existe um vertedouro cuja soleira encontra-se na cota 35 m. Os dois açudes podem ser operados simultaneamente ou separadamente através de válvulas dispersores com tomadas de água nas cotas 18,80 m no açude de Gramame e 20,30 m no açude de Mamuaba. No total o sistema tem capacidade de 56,4 milhões de m³ abrangendo uma área de 589,1km² e o volume morto de 6122000 m³ (SEMARH, 2000). Os dados referentes à curva cota-volume utilizados neste estudo foram extraídos do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (SEMARH, 2000) (TAB. 2).

TABELA 2 – Dados cota x volume do reservatório

Cota (m)	Volume (m³)
17	-
18	20000
19	85000
20	299000
21	722000
22	1442000
23	2537000
24	4048000
25	6122000
26	8945000
27	11964000
28	15454000
29	19721000
30	23305000
31	28646000
32	34651000
33	41238000
34	48492000
35	56937000

Fonte: SEMARH (2000).

Os dados de evaporação utilizados neste estudo foram os valores médios mensais corrigidos pelo coeficiente do tanque classe A para a região do Gramame-Mamuaba por Fonseca (2005), em um estudo sobre avaliação comparativa de indicadores entre bacias distintas no estado da Paraíba (TAB. 3).

TABELA 3 – Evaporação média mensal no reservatório

Evaporação (mm)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
158,9	139,5	118,0	89,2	86,8	94,8	95,2	68,2	152,3	149,0	91,0	70,1

Com relação à demanda de água dos usuários, se analisou os valores outorgados segundo dados da AESA (2014), sendo considerados os usuários com outorgas regularizadas, e em andamento do reservatório, assim descritos: 3 usuários de abastecimento humano, 3 de irrigação e 1 para uso industrial (TAB. 4).

TABELA 4 – Vazão requerida por cada usuário

Usuário	Tipo de Uso	Vazão requerida (m ³ /mês)
U1	Abastecimento	9540,00
U2	Abastecimento	101664,00
U3	Industrial	360000,00
U4	Irrigação	86400,00
U5	Abastecimento	6350400,00
U6	Irrigação	180000,00
U7	Irrigação	67680,00

Para a definição da vazão afluente no reservatório, foram utilizados três dos cenários definidos por Camara (2003), em seu estudo sobre análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do rio Gramame. Para o cálculo das vazões de referências o autor utilizou o modelo PROPAGAR MOO, para tal simulação foi utilizado um intervalo de simulação mensal e o nível crítico de falhas de 90%. As séries de vazões utilizadas foram obtidas com base nas séries naturais de 17 anos (1972 a 1988) gerados pelo o AÇUMOD (ANEXO).

O autor definiu três cenários de vazões de referências para o reservatório, sendo no primeiro cenário utilizado um único valor de Q_{90} (TAB. 5); no segundo cenário dois valores de Q_{90} , quais sejam um para o período seco e um para o período úmido (TAB. 6); e, no terceiro cenário, valores mensais para a vazão de referência Q_{90} (TAB. 7).

Para a vazão ecológica foi utilizado o valor equivalente a 10% da vazão de referência. Essa vazão ecológica no reservatório é adicionada aos valores de vazões requeridas pelos os usuários do sistema.

TABELA 5 – Vazões Q_{90} anuais

Ponto de Captação	Vazão Q_{90} (m ³ /s)
Reservatório	0,4864

TABELA 6 – Vazões Q_{90} do período seco e chuvoso

Ponto de Captação	Vazões Q_{90} (m ³ /s)	
	Período seco	Período chuvoso
Reservatório	0,3487	1,8420

TABELA 7 – Vazões Q_{90} mensais

Vazão (m ³ /s)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0,40	0,66	0,97	1,72	2,96	4,27	2,91	2,13	1,13	0,34	0,33	0,24

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Valor único para a vazão de referência Q_{90} (Cenário 1)

Para este cenário o algoritmo não encontrou nenhuma solução viável, tendo em vista que, o cenário apresentou quebra de restrição a partir mês de agosto relacionada a sustentabilidade de operação do reservatório.

Na TAB. 8 são apresentados os valores individuais percentuais alocados para cada usuário ao longo do ano, na qual é possível destacar que o usuário 4, usuário de irrigação, obteve os melhores valores de atendimento da vazão requerida pelo usuário (55,6%). O usuário 5, usuário mais expressivo do reservatório por representar a demanda de abastecimento necessária para abastecer, dentre outras, a cidade de João Pessoa, apresentou um atendimento médio de 38,9%.

Os baixos valores de atendimento da demanda deste cenário, bem como a ocorrência de alarme, podem ter sido causados além devido à consideração de 50% do nível máximo como nível inicial do reservatório, a utilização de apenas um valor de vazão constante ao longo do ano, como vazão afluyente ao reservatório.

TABELA 8 – Alocação de água para cada usuário, em % da vazão requerida (Cenário1)

Usuário	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
U1	53,1	13,0	87,0	55,0	11,9	18,5	4,8	63,3	48,9	63,3	9,0	54,6	40,2
U2	95,0	15,3	66,3	32,8	24,3	18,0	28,5	4,5	77,0	32,5	73,8	30,1	41,5
U3	59,8	19,5	36,1	50,4	50,4	35,1	83,0	3,3	39,8	30,7	90,4	48,5	45,6
U4	36,6	32,3	74,5	26,7	89,2	45,0	94,8	42,1	92,5	34,3	54,8	45,0	55,6
U5	15,8	11,0	42,0	10,1	38,1	35,2	87,7	19,5	97,9	70,5	0,4	38,4	38,9
U6	97,0	25,2	14,0	46,1	25,4	26,9	48,8	22,1	98,1	63,4	20,9	45,8	44,5
U7	43,6	43,8	38,4	79,6	8,7	13,6	38,9	29,3	20,0	3,5	30,9	27,9	31,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

4.2 Valores sazonais de vazão de referência Q_{90} (Cenário 2)

Diferentemente do cenário 1 este cenário encontrou solução viável, tendo em vista que, ao final da otimização nenhuma das restrições de operação do reservatório foi violada.

Na TAB. 9 são apresentados os valores percentuais da vazão alocada para cada usuário ao longo do ano, donde se constata o usuário 6, usuário de irrigação, como o que recebeu o maior valor de vazão requerida atendida ao longo de todo o ano (59,9%). Não diferentemente, o usuário 7, de irrigação, também apresentou resultado considerável, em torno de 55% de atendimento da vazão requerida. Vale salientar que este cenário é caracterizado pela utilização de dois valores de Q_{90} , sendo que entre os meses setembro e fevereiro foi utilizado o valor correspondente ao período considerado seco, e um valor de Q_{90} entre os meses de março a agosto correspondente a estação chuvosa.

TABELA 9 – Alocação de água para cada usuário, em % da vazão requerida (Cenário 2)

Usuário	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
U1	69,0	70,9	2,5	6,2	99,3	49,6	72,7	38,1	33,7	74,3	60,7	66,8	53,7
U2	72,0	1,3	23,0	38,8	20,8	23,9	39,1	0,6	92,2	30,5	40,9	4,3	32,3
U3	81,2	35,9	10,2	88,2	67,7	41,1	69,9	28,5	48,7	35,0	94,7	36,6	53,1
U4	38,0	45,4	38,6	6,7	84,7	43,5	83,5	61,1	71,9	76,2	15,0	35,7	50,0
U5	0,6	27,6	20,2	50,0	10,4	6,4	31,1	0,1	36,5	70,6	98,2	40,0	32,6
U6	19,6	56,8	57,7	44,0	74,7	80,0	18,3	98,7	88,5	75,0	7,9	98,2	59,9
U7	93,6	33,2	75,7	50,1	17,1	78,5	70,4	85,4	26,3	38,1	13,6	82,9	55,4

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

4.3 Valores mensais de vazão de referência Q_{90} (Cenário 3)

Não diferentemente do cenário 2 este cenário ao final da otimização também encontrou solução viável, tendo em vista que, nenhuma das restrições de operação do reservatório foi violada.

Na TAB. 10 são apresentados os valores percentuais correspondentes à vazão alocada para cada usuário ao longo do ano, na qual, se observa que o usuário 3, uso industrial, foi o que recebeu o maior valor de vazão (57,6%), valor bem próximo foi encontrado no usuário 6, de irrigação, com 57% da vazão requerida atendida.

TABELA 10 – Alocação de água para cada usuário, em % da vazão requerida
(Cenário 3)

Usuário	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
U1	11,5	80,4	56,5	45,6	33,1	25,1	29,2	6,0	48,7	75,5	35,3	23,9	39,2
U2	43,3	78,5	54,5	25,4	68,9	3,2	31,8	52,1	95,3	63,4	68,9	7,2	49,4
U3	49,6	88,8	54,5	55,5	81,4	44,9	85,5	4,7	68,1	32,8	30,3	94,7	57,6
U4	50,6	32,6	36,8	26,7	85,9	59,8	67,0	54,3	7,3	48,7	44,2	29,2	45,3
U5	32,1	12,9	72,9	77,9	63,1	25,2	79,6	69,5	1,4	71,8	45,0	84,4	53,0
U6	39,8	3,2	79,1	62,3	10,3	92,7	42,5	69,6	91,8	84,4	33,9	74,2	57,0
U7	98,8	14,9	51,5	53,9	55,6	8,1	69,1	53,2	31,9	66,0	22,3	78,3	50,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, percebe-se que a metodologia foi capaz de representar e considerar os diferentes objetivos, simultaneamente, de forma a ampliar o seu poder de auxílio no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Além disso, o algoritmo genético permite que diferentes soluções possam ser geradas por meio de ajustes e de combinação de seus parâmetros, como também na definição de coeficientes de demanda e nível de alerta do reservatório diferentes dos utilizadas neste estudo, resultando em uma variedade de soluções possíveis.

De forma geral o algoritmo apresentou bons resultados para o problema de alocação de água do reservatório Gramame-Mamuaba sendo que o cenário 2 e 3 foram os que obtiveram os melhores resultados, pois resultaram em soluções de alocação viáveis com atendimento da demanda chegando a 57,6% da vazão requerida atendida e (usuário 3) 59,9% no cenário 2 (usuário 6).

É importante ressaltar as limitações a que está sujeito o estudo realizado e nessa perspectiva, sugerir para trabalhos futuros a utilização de múltiplas funções objetivo, considerando, por exemplo, os aspectos da qualidade da água do reservatório, e a inserção da informação de prioridade de uso da água, conforme preconizado na Lei nº 9.433/1997, bem como, a utilização de operadores denominados direcionados tal como sugerido por Machado (2011), haja vista que, eles priorizam a técnica de *exploitation*, que consiste em utilizar as informações presentes nas soluções já encontradas para guiar a busca.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, R. **Impactos do lançamento de Efluentes na Qualidade da Água do Riacho Mussuré**. João Pessoa: UFPB. 140p. Dissertação (Mestrado) do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, João Pessoa, 2006.

BALTAR, A. M.; AZEVEDO, L. G. T; RÊGO, M. e PORTO, R. L. L. **Sistemas de suporte à decisão para a outorga de direitos de uso da água no Brasil**. In Série Água Brasil 2, Banco Mundial, Brasília. 2003.

BHAKTIKUL, K.; SOIPRASERT, N e SOMBUNYING, W. **Comparison of Genetic Algorithm and WASAM model for Real Time Water Allocation**: A Case Study of Song Phi Nong Irrigation Project. 4th INWEPF Steering Meeting and Symposium. Bangkok, Thailand. 2007.

BRAGA, C. F. C.; DINIZ, L. S.; GARJULLI, R.; SILVA, L. M. C.; NOGUEIRA, G. M. F.; NASCIMENTO Jr., C. N. S.; MEDEIROS, S. D. e RÊGO, M. F. F. Construção do marco regulatório do sistema Curema Açu. **Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, São Luís - MA. 2004.

BRASIL, Lei nº 9.433 de 8 de Janeiro de 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso: 14 de Julho de 2014.

BRASILEIRO, E. **Um algoritmo genético para otimização do controle em tempo real de redes de escoamento de petróleo**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2005.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. e PILAR, J. V. Otimização da operação de reservatórios: Estado-da-arte. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa. 2005. 1 CD-ROM.

CAMARA, A. C. F. C. **Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do rio Gramame (PB)**. Porto Alegre: UFRS. 219f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CELESTE, A. B., SUZUKI, K. e KADOTA, A. Algoritmos genéticos para operação ótima de sistemas de recursos hídricos em tempo real. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 8, n3, p. 71-78. 2003.

COELLO, C.; VELDHUIZEN, D. e LAMONT, G. **Evolutionary Algorithms for Solving MultiObjective Problems**. Kluweracademic, Plenumpublishers, 576 p, 2002.

CORDEIRO NETO, O. **Conflitos no uso da água**. I curso de especialização em gerenciamento socioambiental. UFPE/CHESF, Recife-PE. 2005.

COSTA, A. C.; CAMPOS, J. N. B. Participação dos usuários na alocação da água dos reservatórios no Ceará: Os casos do Jaguaribe e Banabuiú em 2002. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa – PB, 2005.

FELINTO, C. M. R. **Geoprocessamento como ferramenta do diagnóstico entre oferta e demanda hídrica na Bacia do Rio Gramame – PB**. 36 f. :il.color.Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2013.

FONSECA, F.; ARAGÃO, T. G.; CURI, W. F. e CURI, R. C. Avaliação comparativa de indicadores entre bacias distintas no estado da Paraíba. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa – PB. 2005. 1 CD ROM.

GOLDBERG, D. E. “**Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**”, Addison-Wesley, Reading, Mass. 1989.

KOUTSOYIANNIS, D., ESTRATIADIS, A., KARAVOKIROS, G. **A decision support tool for the management of multi-reservoir systems**. Journal of the American Water Resources Association, vol. 38(4), p. 945-958. 2002.

KOZA, J. R. **Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection**. ISBN 0262111705. MIT Press, 1992.

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.

LACERDA, E.; CARVALHO, A. **Introdução aos algoritmos genéticos**. In: GALVÃO, C.; VALENÇA, M. (organizadores), **Sistemas inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. ABRH, editora UFRGS, Porto Alegre, p. 99 – 150. 1999.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2012. 475p.

MACHADO, E. C. M. N. **Metodologia multiobjetivo para alocação da vazão excedente em bacias hidrográficas**. Campina Grande: UFCG. 131f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MACHADO, E. C. M. N. **Operação de redes de escoamento de petróleo utilizando algoritmo genético multiobjetivo**. Campina Grande: UFCG. 161f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

MOEDINGER, L. H. **Algoritmos evolutivos e inteligência coletiva aplicados a problemas de otimização não-linear com restrições**: fundamentos e estudo comparativo. Curitiba: UCP. 77f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia da Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.

MOREIRA, R. M. **Alocação de recursos hídricos em regiões semi-áridas**. Rio de Janeiro: UFRJ. 119f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MICHALEWICZ, Z.; FOGEL, D. How to solve it: **Modern Heuristics**. Springer, Berlim, 460p. 2002.

MICHALEWICZ, Z.; HINTERDING, R.; MICHALEWICH, M. Evolutionary Algorithms. In PEDRYCZ, W. (editor), **Fuzzy Evolutionary Computation**. Capítulo 2, Kluwer Academic, 1997.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Mit Press. 1997. 207 p.

NUNES, E. M. **Poluição Industrial da Bacia do Rio Gramame e Conflito Socioambiental**: Análise da Complexidade a Partir dos Atores, Impactos e Perspectivas. João Pessoa: UFPB. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

ONO, S. **Sistema de suporte a decisão para gestão de água urbana - URBSSD / S. Ono.** -- São Paulo. 148p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2008.

SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; R. C.; VIEIRA, A. S. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos: II Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** Volume 16, n.4, p. 61-71. 2011.

ROCQUE JR., ARTHUR J. Pesquisa: Report to the General Assembly on State Water Allocation Policies Pursuant to Public Act 98-224Connecticut.Department of Environmental Protection. Disponível em: < http://assets.wwf.org.uk/downloads/scarce_water.pdf >. Acesso em: 20 jul. 2014.

SEMARH. **Plano diretor de recursos hídricos da Bacia do rio Gramame.** Governo do Estado da Paraíba, Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH, 2000.

TRIGUEIRO, H. O. **Otimização estocástica implícita e algoritmos genéticos como suporte na operação mensal do reservatório de São Gonçalo – PB.** 50fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2014.

VALORY, J. P. L. **Aplicação combinada de método de otimização e modelo de qualidade de água na determinação de eficiências de sistemas de tratamento de efluentes domésticos:** uma abordagem para gerenciamento de bacias hidrográficas. 114f. Dissertação (Mestrado) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, 2013.

VALORY, J. P. L.; FRAUCHES, V. G. L.; REIS, J. A. T. e MENDONÇA, A. S. F. Aplicação combinada de técnicas de otimização e de modelagem de água no

processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos. **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves – RS. 2013. 1 PEN DRIVE.

VIEIRA, Z. M.; RIBEIRO, M. M. Análise de conflitos: Apoio à decisão no gerenciamento da demanda urbana de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 10, n. 3. 2005.

WANG, X.; SUN, Y.; SONG, L.; MEI, C. **An eco-environmental water demand based model for optimising water resources using hybrid genetic simulated annealing algorithms. Part I. Model development.** Journal of Environmental Management 90:2628–2635. 2009.

WWF. Pesquisa: Allocating scarce water a primer on water allocation, water rights and water markets. Disponível em: <http://www.ct.gov/deep/lib/deep/water_inland/diversions/water_alloc_rpt/wtrallc.pdf> . Acesso em: 10 fev. 2014.

ANEXO

Ano	Precipitação (mm)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1972	42,03	95,98	119,46	284,09	340,77	296,46	159,43	238,4	95,44	28,69	5,92	76,61
1973	81,52	88,6	116,39	296,67	210,68	447,65	183,32	90,37	119,2	31,31	16,1	27,9
1974	102,06	124,9	228,1	240,84	296	177,54	282,05	106,33	136,52	17,75	30,48	48,45
1975	53,9	41,09	80,39	63,39	248,88	242,04	375,55	100,72	58,1	22,56	28,46	106,22
1976	30,4	108,72	382,17	162,38	220,64	164,59	250,96	66,43	23,39	118,58	31,32	75,49
1977	132,84	96,96	95,33	170,8	245,14	306,3	258,32	83,27	45,35	44,51	47,29	30,94
1978	11,08	150,38	156,36	369,03	222,32	178,01	384,95	132,67	168,95	58,68	81,33	71,54
1979	51,5	113,55	123,21	143,36	259,73	196	107,49	84,62	179,15	17,2	46,56	25,33
1980	101,22	123,69	268,41	85,84	144,5	279,87	101,93	87,8	51,56	59,98	34,17	59,82
1981	78,87	106,53	237,18	74,07	232,28	121,86	116,47	54,71	140,02	18,66	34,5	120,02
1982	43,34	112,94	74,24	193,84	299,58	186,03	237,24	222,59	162,41	16,52	64,34	21,1
1983	41,06	139,91	172,38	75,44	153,31	108,89	72,93	86,25	48,67	46,46	6,77	16,85
1984	109,57	54,61	106,01	257,46	375,63	156,77	226,88	177,23	44,49	70,58	40,23	3,13
1985	102,61	137,32	309,29	267,41	212,66	346,61	420,06	163,79	98,16	7,57	25,92	44,16
1986	115,84	89,44	274,6	212,52	264,69	271,31	228,57	185,63	155,57	67,48	114,97	35,71
1987	46,4	134,9	260,19	257,08	102,03	304,63	305,02	108,97	47,3	30,56	13,63	7,85
1988	68,33	52,23	221,54	224,31	220,45	270,87	360,77	148,62	35,86	12,01	39,81	47,59