



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR – CCTA
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL – UACTA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

HALANA OLIVEIRA TRIGUEIRO

**OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA IMPLÍCITA E ALGORITMOS GENÉTICOS COMO
SUPORTE NA OPERAÇÃO MENSAL DO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO - PB**

POMBAL – PB

2014

HALANA OLIVEIRA TRIGUEIRO

**OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA IMPLÍCITA E ALGORITMOS GENÉTICOS COMO
SUPORTE NA OPERAÇÃO MENSAL DO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO - PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.

POMBAL – PB

2014

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

MON
T828o

Trigueiro, Halana Oliveira.

Otimização estocástica implícita e algoritmos genéticos como suporte na operação mensal do reservatório de São Gonçalo - PB / Halana Oliveira Trigueiro. - Pombal, 2014.

50fls.

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

"Orientação: Prof. Pós-Dr. Camilo Allyson Simões de Farias".
Referências.

1. Reservatório Hídrico. 2. Sistema Hídrico - Otimização. I. Farias, Camilo Allyson Simões de. II. Título.

UFCG/CCTA

CDU 628.14

HALANA OLIVEIRA TRIGUEIRO

OTIMIZAÇÃO ESTOCÁSTICA IMPLÍCITA E ALGORITMOS GENÉTICOS COMO SUPORTE NA OPERAÇÃO MENSAL DO RESERVATÓRIO SÃO GONÇALO - PB

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias.

Aprovado em 14 de Fevereiro de 2014.

BANCA EXAMINADORA

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

Orientador

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

Examinadora Interna

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

Examinador Externo

Aos meus pais, Edileuza e Habacuc, ao meu irmão, Hélio, ao meu namorado, Wallison Cleyton, que sempre me incentivaram e apoiaram, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por estar sempre guiando e iluminando meus caminhos, por ter me concedido força e coragem para concluir mais esta etapa da minha vida.

À minha família, em especial aos meus pais Habacuc e Edileuza, e ao meu irmão Hélio, pelo amor, confiança e incentivo nessa fase do meu curso de graduação e durante toda minha vida.

Ao meu namorado, Wallison Cleyton, pela paciência, amor, dedicação, incentivo e companheirismo durante todos os dias dessa minha jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Camilo Allyson Simões de Farias, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência, dedicação e orientação efetiva desse trabalho.

A Prof.^a Dr.^a Érica Cristine Medeiros Nobre Machado pela amizade, estímulo, apoio, dedicação e paciência compartilhados ao longo do curso.

A todos os professores da Unidade Acadêmica de Ciência e Tecnologia Ambiental – UACTA/CCTA/UFCG - Campus de Pombal, pelos conhecimentos e formação que recebi durante esses cinco anos de batalha.

Aos amigos Juliana, Kaiane, Kátia e Marcílio, que desde o começo estiveram comigo, convivendo, aprendendo e ajudando uns aos outros.

Aos meus amigos e colegas da UFCG, que se tornaram muito mais que apenas colegas de sala e de curso, tornaram-se amigos para o resto da vida. Não vou citar nomes, para não correr o risco de ser injusta com alguém.

Ao Prof. Dr. Valterlin da Silva Santos, pelos dados disponibilizados para este trabalho.

Aos funcionários e colegas do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, pelos serviços prestados.

A todos, que de maneira direta ou indireta contribuíram para a minha formação e a realização deste trabalho.

Muito obrigada a todos!

RESUMO

Esse trabalho visa o desenvolvimento de um modelo baseado em Otimização Estocástica Implícita (OEI) e Algoritmos Genéticos (AG) para calibrar regras mensais de operação. A técnica de OEI consiste em otimizar a operação do sistema utilizando um conjunto de possíveis cenários de vazão e no posterior uso dos dados ótimos para construção de regras operacionais. Nessa pesquisa, os dados ótimos obtidos com OEI foram utilizados por modelos de AG para calibrar regras discretas de alocação com base no volume disponível de água para o mês corrente. Os cenários sintéticos de vazões afluentes foram obtidos pelo Método dos Fragmentos. A metodologia proposta foi aplicada para operação do reservatório São Gonçalo, que está localizado na região semiárida do estado da Paraíba. Uma função de custos de escassez de água foi utilizada para fins de avaliação e os resultados indicam que as regras OEI-AG são superiores a uma regra de operação padrão. Assim, espera-se que estas regras possam dar suporte na tomada de decisão para operação mensal do sistema hídrico São Gonçalo.

Palavras-Chave: Inteligência artificial, otimização Monte Carlo, operação de reservatórios, Método dos Fragmentos, semiárido.

ABSTRACT

This paper aims at developing a model based on Implicit Stochastic Optimization (ISO) and Genetic Algorithms (GA) for deriving monthly reservoir hedging rules. The ISO technique consists of optimizing the reservoir system operation using a set of possible scenarios of inflows and using the optimal data for construction operating rules. In this research, the optimal data obtained with ISO was used by GA in order to calibrate operating rules based on the volume of available water for the current month. Synthetic scenarios inflows were obtained by the Method of Fragments. The proposed methodology was applied to the operation of São Gonçalo reservoir, which is located in the semiarid region of Paraíba State, Brazil. A mathematical function comprising the cost of water scarcity was evaluation and the results indicate that the ISO–GA rules are superior to a standard rule of operation. As a result, the generated rules may support the decision making process for the monthly operation of São Gonçalo water system.

Keywords: artificial intelligence, Monte Carlo optimization, reservoir operation, Method of Fragments, semiarid.

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Curva Área x Volume do reservatório São Gonçalo – PB.....	28
GRÁFICO 2 – Custos de Escassez de Água.....	31
GRÁFICO 3 – Representação das regras mensais para operação do reservatório São Gonçalo.....	33
GRÁFICO 4 – Política de Operação Linear Padrão.....	35
GRÁFICO 5 – Comparação entre as médias da série sintética obtida pelo MF com os valores das médias da série histórica.....	36
GRÁFICO 6 – Comparação entre os desvios padrão da série sintética obtida pelo MF com os valores dos desvios padrão da série histórica.....	37
GRÁFICO 7 – Volumes do reservatório para operação entre 1983 – 1989 com todos os modelos.....	39
GRÁFICO 8 – Alocações de água para operação do reservatório entre 1983 – 1989 com todos os modelos.....	39

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Sistema hídrico composto pelo reservatório São Gonçalo.....	25
FIGURA 2 – Visão panorâmica do Reservatório São Gonçalo.....	26
FIGURA 3 – Fluxograma representativo dos Modelos utilizados nesta pesquisa.....	28
FIGURA 4 – Fluxograma representativo do modelo OEI-AG.....	29
FIGURA 5 – Fluxograma representativo do Modelo de AG.....	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dados referentes ao reservatório São Gonçalo – PB.....	26
TABELA 2 – Demandas mensais do sistema São Gonçalo – PB.....	26
TABELA 3 – Precipitação média mensal em São Gonçalo – PB (mm).....	27
TABELA 4 – Evaporação média mensal em São Gonçalo – PB (mm).....	27
TABELA 5 – Vazão média mensal em São Gonçalo – PB (m ³ /s).....	27
TABELA 6 – Critérios de racionamento de água e volumes para disparo de racionamento.....	39
TABELA 7 – Custo da escassez de água, em bilhões de reais, para 10 novas simulações de 100 anos considerando todos os modelos.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OEI – Otimização Estocástica Implícita

MF – Método dos Fragmentos

AG – Algoritmos Genéticos

PNL – Programação Não Linear

FO – Função Objetivo

SLOP – Política Operacional Linear Padrão, do inglês *Standard Linear Operation Policy*

PISG – Perímetro Irrigado de São Gonçalo

PDRH/PB – Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra a Seca

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

MODHAC - Modelo Hidrológico Auto Calibrável

WTP – Disposição a Pagar, do inglês *Willingness to Pay*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 PLANEJAMENTO E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	17
2.1.1 Aspectos Legais	18
2.2 TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO.....	19
2.2.1 Simulação	19
2.2.2 Otimização	19
2.2.2.1 Programação Não Linear.....	20
2.2.2.2 Otimização Estocástica.....	20
2.2.2.3 Algoritmos Genéticos.....	21
2.3 REGRAS DE OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS.....	22
2.4 ECONOMIA DE RECURSOS HÍDRICOS.....	23
3 METODOLOGIA	25
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	25
3.2 REGRAS OPERACIONAIS.....	28

3.2.1 Modelo OEI-AG.....	29
<i>3.2.1.1 Geração Estocástica de Vazões.....</i>	<i>29</i>
<i>3.2.1.2 Modelo Determinístico.....</i>	<i>30</i>
<i>3.2.1.3 Calibração das Regras de Operação.....</i>	<i>32</i>
<i>3.2.1.4 Modelos de AG.....</i>	<i>33</i>
3.2.2 SLOP.....	34
3.2.3 Modelo Determinístico de Previsão Perfeita.....	35
4 APLICAÇÃO E RESULTADOS.....	36
4.1 GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DE VAZÕES.....	36
4.2 REGRAS OPERACIONAIS.....	37
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
ANEXOS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural essencial à manutenção da vida no planeta Terra e indispensável para o desenvolvimento social e econômico da humanidade. Para isso, os recursos hídricos precisam estar disponíveis em quantidade e qualidade adequadas. Os expressivos aumentos de demanda e da poluição dos corpos hídricos, associados a um desenvolvimento desordenado e sem compromisso com o uso sustentável dos recursos naturais, têm dado suporte a atual crise da água no mundo. Esses fatores dificultam o planejamento e a gestão dos recursos hídricos principalmente em regiões semiáridas, onde a escassez limita o progresso econômico e aumenta os conflitos entre os vários usuários deste recurso (FARIAS, 2009; LOGAR; BERGH, 2013; VIEIRA, 2011).

No caso do Nordeste do Brasil, a gestão adequada dos recursos hídricos é ainda mais complexa, uma vez que está relacionada com as condições climáticas extremas da região, tais como elevadas taxas de evapotranspiração e distribuição irregular de chuvas no espaço e tempo (CARNEIRO; FARIAS, 2013).

Nesse sentido, as características hidrológicas do semiárido nordestino e as frequentes secas que ocorrem na região despertam um grande interesse no desenvolvimento de métodos que possam minimizar os efeitos decorrentes da falta de água. Atualmente é comum o uso de regras de operação de sistemas hídricos baseadas em técnicas tradicionais de otimização para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos existentes (CELESTE et al., 2005; FARIAS, 2009; VIEIRA; SANTOS; CURI, 2010; VIEIRA, 2011).

A técnica de Otimização Estocástica Implícita (OEI) é uma alternativa bastante promissora, visto que consiste em otimizar a operação de um sistema considerando um conjunto de possíveis cenários de entrada e no posterior uso dos dados ótimos obtidos para elaboração de políticas de operação. Essas políticas de operação são normalmente definidas por meio do uso de equações de regressão linear (CELESTE et al., 2005).

Nesse contexto, uma alternativa que vem sendo aplicada para este tipo de problema consiste em combinar as técnicas de OEI com métodos de inteligência artificial, a exemplo dos trabalhos de Farias (2009) e Neelakantan e Pundarikanthan (1999), que dispensaram o uso de regressão linear para definição das regras operacionais.

Os Algoritmos Genéticos são algoritmos baseados na teoria da evolução de Charles Darwin, de simples implementação, que utilizam métodos de otimização probabilística em uma busca complexa para solução de problemas com diferentes objetivos e restrições (GOLDBERG, 1989; HOLLAND, 1975; MACHADO, 2006; MICHALEWICZ, 1999).

1.1 Justificativa

De modo geral, as dificuldades com relação ao uso da água em regiões semiáridas são bastante antigas e relevantes. A situação do semiárido nordestino é uma das mais preocupantes, pois este enfrenta o problema do baixo volume de chuvas combinado com altas taxas de evaporação, além da falta e/ou ineficiência de políticas públicas para minimizar ou eliminar a escassez hídrica da região (BATISTA, 2013; VIEIRA; SANTOS; CURI, 2010).

Ao longo do tempo, uma das alternativas encontradas para mitigar esses problemas foi à construção de reservatórios com a finalidade de armazenar água em época de chuvas para ser utilizado nos períodos de seca. Mesmo assim, essa opção não foi suficiente para se obter a tão desejada independência hídrica, principalmente pela falta de um gerenciamento eficiente desses reservatórios, chegando-se a se falar em transposição de bacias durante décadas (BATISTA, 2013; VIEIRA; SANTOS; CURI, 2010).

O reservatório São Gonçalo foi construído na década de 1930 com o intuito de diminuir os problemas com a disponibilidade hídrica e auxiliar no desenvolvimento econômico da microrregião do Município de Sousa - PB, com destaque para o Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG), que possui grande importância pelas atividades agrícolas desenvolvidas (FARIAS, 2004).

Em contrapartida, o crescimento econômico e populacional vêm acarretando uma pressão maior sobre o reservatório, ocasionando falhas no atendimento das demandas, tanto para o abastecimento urbano quanto para o PISG. Além disso, nos últimos anos, estiagens severas têm sido observadas nessa região, que, devido às precipitações insuficientes durante o período de chuvas, impossibilitam a reposição do volume de água do reservatório, provocando perdas para os agricultores e racionamentos para as populações que são abastecidas por São Gonçalo (BATISTA, 2013).

Esses problemas juntamente com o gerenciamento insuficiente do reservatório provocam conflitos entre os usuários e os órgãos responsáveis pela gestão. Somase a este cenário, o atraso na conclusão das obras do Projeto de Transposição do rio São Francisco, que poderá garantir uma vazão ao reservatório em questão, possibilitando um aumento na oferta de água e minimizando os problemas de escassez.

Diante do exposto, este trabalho tem como finalidade propor regras discretas que auxiliem na operação ótima dos recursos hídricos provenientes do reservatório São Gonçalo, utilizando técnicas de OEI combinadas com AG. Os AG são utilizados para calibração de parâmetros de regras discretas pré-definidas com base nos dados ótimos obtidos pelo modelo de OEI.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento e a aplicação de técnicas de Otimização Estocástica Implícita (OEI) combinada com Algoritmos Genéticos (AG) a fim de calibrar regras mensais de operação para o reservatório São Gonçalo, localizado na região semiárida do estado da Paraíba, Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar a aplicabilidade do Método dos Fragmentos para geração de vazões de entrada ao reservatório São Gonçalo - PB;
- Desenvolver e usar um modelo de OEI para otimização da operação do sistema considerando diversos cenários de vazão e critérios econômicos;
- Implementar um modelo de AG para calibração de regras de operação de reservatórios pré-definidas com base nos dados ótimos obtidos pelo modelo de OEI;
- Comparar as regras operacionais geradas pelo modelo OEI-AG com o SLOP.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

A maioria dos modelos de análise de recursos hídricos utilizam o planejamento e o gerenciamento como forma de promover a gestão de águas. O planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos visam uma forma de ajustar as intervenções do homem sobre esses recursos, de modo que os aspectos sociais, ambientais e institucionais sejam inseridos e permitam a operação dos sistemas hídricos de maneira economicamente eficiente e com flexibilidade. Para isso, é fundamental que o modelo de gerenciamento realize a separação entre a oferta e as atividades de uso da água, já que muitos dos conflitos existentes possuem uma relação direta com o tipo de uso adotado ao recurso água, dentre os quais se podem citar: água para abastecimento urbano e agrícola, que competem pelo mesmo recurso e acabam por gerar os maiores conflitos; e a água para geração de energia elétrica, regularização de vazões, etc., pelo qual uns geram recursos para outros (SANTOS, 2007; SETTI et al., 2000; VIEIRA, 2011).

Nesse sentido, uma atividade de grande importância para minimizar os conflitos pela água é a operação otimizada de reservatórios. Em sistemas de recursos hídricos, as técnicas e ferramentas utilizadas nessa aplicação são elaboradas a partir de metodologias matemáticas e suporte computacional, somando-se a isto os métodos de otimização e simulação. Esses métodos permitem o desenvolvimento de uma base extensa de dados que irão auxiliar nas decisões em gerenciamento de reservatórios. Além disso, o uso desses procedimentos está sendo constantemente inserido no planejamento de operações para projetos reais (VIEIRA, 2011).

Entretanto, vale salientar que esses modelos possuem suas limitações, das quais temos: dificuldade de representação matemática de alguns processos físicos; restrições computacionais que provocam receio nos operadores com relação ao modelo proposto; variedade de métodos, o que dificulta a seleção; entre outros. Mas, ainda assim, o planejamento é de grande importância para garantir a melhor forma de utilização dos recursos hídricos, considerando sua disponibilidade e a prioridade nos usos, para que os processos ecológicos sejam preservados e todos os usuários sejam atendidos.

2.1.1 Aspectos Legais

Em termos de legislação brasileira sobre os recursos hídricos, a implantação do Código de Águas em 1934, através do Decreto Lei n.º 24.643, foi o primeiro grande marco. Esse código dispõe sobre normas que tratam de: águas no geral e sua propriedade; aproveitamento das águas; e forças hidráulicas – regulamentação da indústria hidroelétrica (BRASIL, 1934).

Naquela época, a água era tida como um recurso natural renovável voltado para o desenvolvimento industrial e agrícola no país, principalmente a produção de energia elétrica. Nas décadas seguintes, essa legislação tornou-se insuficiente diante do crescimento econômico e populacional, conseqüentemente com o aumento das demandas por água e dos conflitos pela sua utilização. Essa questão impulsionou discussões sobre a criação de um sistema integrado e descentralizado, originando em 1997 e 2000, as leis n.º 9.433 e n.º 9.984, respectivamente (BATISTA, 2013).

A Lei n.º 9.433 de 8 de janeiro de 1997 instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH – 1997) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos. A principal característica dessa nova lei é sua singularidade em unir os princípios fundamentais do setor, criar os instrumentos de gestão para o uso dos recursos hídricos e estabelecer princípios para os múltiplos usos. Em seu artigo 2.º, tem como objetivos:

- I - assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- II - a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável;
- III - a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (Art. 2º da Lei 9.433; BRASIL, 1997).

E, em seu artigo 32, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, com os seguintes objetivos:

- I - coordenar a gestão integrada das águas;
- II - arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos;
- III - implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos;
- IV - planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos;
- V - promover a cobrança pelo uso de recursos hídricos (Art. 32º da Lei 9.433; BRASIL, 1997).

Já a Lei 9.984, sancionada em 17 de Julho de 2000, dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA, que de acordo com seu artigo 3.º é uma “autarquia sob regime especial, com autonomia administrativa e financeira, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, com a finalidade de implementar, em sua esfera de atribuições, a Política Nacional de Recursos Hídricos, integrando o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (BRASIL, 2000).

2.2 Técnicas de Simulação e Otimização

2.2.1 Simulação

A simulação tenta reproduzir a maneira como um sistema se comporta diante de condições pré determinadas. De acordo com Melo (2004), a simulação tem como objetivo “representar e operar o sistema da forma mais detalhada possível e fornecer informações para avaliar o comportamento do sistema real”.

Estes modelos são considerados relativamente simples e flexível, pois sua principal exigência é que o sistema possa ser representado matematicamente, sendo estas suas principais vantagens (MELO, 2004; SANTOS, 2007; VIEIRA, 2011). A principal desvantagem é que esses modelos não são capazes de gerar uma solução ótima, apenas um valor próximo que pode ser determinado por meio de numerosas tentativas (SANTOS, 2007).

2.2.2 Otimização

Os modelos de otimização são técnicas muito empregadas no planejamento e operação de sistemas hídricos. Políticas ótimas fazem parte de uma busca diretamente relacionada com a escolha das variáveis de operação (LOUCKS et al.,1981).

Estas variáveis se dividem dois grupos: variáveis de decisão e de estado. As variáveis de decisão representam a solução ótima e as de estado os resultados para os valores atribuídos às variáveis de decisão. A procura pela combinação ótima das variáveis de decisão pretende minimizar ou maximizar uma função objetivo sujeito a funções de restrições, que é a finalidade das técnicas de otimização (FARIAS, 2009).

Conforme Farias (2009), os modelos de otimização levam em consideração algum tipo de programação matemática, podendo ser classificados em:

programação linear; programação dinâmica; programação não linear e métodos heurísticos (algoritmos genéticos, redes neurais artificiais, lógica *fuzzy* ou difusa, colônia de formigas, etc.). Esses tipos de programação têm sido amplamente utilizados em problemas que envolvem recursos hídricos e algumas de suas aplicações podem ser vistas nos trabalhos desenvolvidos por Rosal (2007), Tu, Hsu e Yeh (2003) e Vieira (2007). Trabalhos com redes neurais artificiais e aplicações de lógica difusa podem ser encontrados em Farias et al. (2006) e Fontane et al. (1997), respectivamente. Um exemplo de colônia de formigas aplicado aos recursos hídricos é dado por Kumar e Reddy (2006).

2.2.2.1 Programação Não Linear

A programação não linear (PNL) é bastante requisitada no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, que pode ser justificado pelas características dos problemas que envolvem o manejo das águas, normalmente representados por equações não-lineares.

A PNL é uma técnica de otimização utilizada para maximização ou minimização de uma função objetivo (FO), de modo que pelo menos uma das restrições ou a FO seja uma equação não linear.

Uma das desvantagens da PNL é sua complexidade matemática requerendo maior tempo de processamento para realizar o procedimento de otimização. Apesar disso, o desenvolvimento de recursos computacionais mais potentes vem permitindo a aplicação da PNL para solução de problemas de recursos hídricos, mesmo com o processo da linearização sendo ainda bastante utilizado e com as dificuldades em garantir que a solução encontrada não seja a ótima global (VIEIRA, 2011).

2.2.2.2 Otimização Estocástica

Os modelos de otimização podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. Os modelos determinísticos consistem na otimização das variáveis de decisão de um determinado problema, admitindo que as variáveis de entrada sejam certas. Em recursos hídricos, o principal objetivo desses modelos é encontrar as alocações mensais de água que satisfaçam as demandas sem comprometer o sistema hídrico (FARIAS, 2009).

Esse tipo de abordagem precisa tornar um evento probabilístico como determinístico, ou seja, necessita de condições hidrológicas predefinidas para que uma política ótima seja determinada e o mesmo seja utilizado em eventos semelhantes no futuro, o que nem sempre é possível (ROBERTO, 2002).

Em contraste, os modelos estocásticos consideram que existem variáveis incertas no sistema. Um dos modelos mais comuns de otimização estocástica é a Otimização Estocástica Implícita (OEI).

Na técnica de OEI, também chamada de otimização Monte Carlo, usa-se um modelo de série temporal, usualmente determinada por modelos estatísticos, para geração de cenários sintéticos de entrada ao sistema (e.g., vazões). O sistema é então otimizado considerando-se estes cenários e políticas de operação são produzidas através de modelos de regressão linear múltipla. Na maioria dos casos, as políticas operacionais geradas relacionam alocações com o volume do reservatório e vazões esperadas (CELESTE et al., 2005; YOUNG, 1967; WILLIS et al., 1984).

2.2.2.3 Algoritmos Genéticos

Algoritmos Genéticos (AG) são modelos de otimização inspirados nos mecanismos de evolução dos seres vivos, isto é, compreendem os processos de seleção e genética das populações, semelhante ao princípio de seleção natural e sobrevivência do mais apto, criado por Charles Darwin em 1859, no seu livro “*A origem das espécies*”. Os AG tiveram início com os trabalhos de Holland (HOLLAND, 1975) e foram popularizados por David Goldberg (GOLDBERG, 1989).

Modelos de algoritmo genético geralmente são compostos da seguinte estrutura:

- 1) Definição do sistema de variáveis da função (real ou binária) e o objetivo do problema;
- 2) Escolha da população inicial, que consiste em um conjunto de soluções iniciais (cromossomos) para o problema, normalmente selecionados aleatoriamente;
- 3) Avaliação e seleção de soluções. Neste passo, as melhores soluções são transferidas para a próxima geração (elitismo) e o restante submetidas a operações genéticas (*crossover* e *mutação*), a fim de gerar uma nova população de soluções;

4) É realizada a definição e verificação de um critério de parada. O procedimento se repete até que o AG atinja o seu critério de parada (FARIAS; TRIGUEIRO; KADOTA, 2014, no prelo). Maiores detalhes podem ser encontrados nos trabalhos de Holland (1975) e Michalewicz (1999).

Nesse contexto, uma comparação entre os AG e outros métodos de otimização pode ser realizada, demonstrando uma série de vantagens que este possui, principalmente quando se trata de problemas representados por funções não lineares e/ou descontínuas.

Dentre as vantagens dos AG, conforme cita Goldberg (1989) e Machado (2006), têm-se: simplificação na formulação e solução de problemas de otimização; flexibilidade quanto aos tipos de função-objetivo que podem ser utilizadas; combinação com outras técnicas de otimização; otimização de parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas, descontínuas e/ou não deriváveis, entre outras.

A principal desvantagem dos AG está no tempo de processamento, que pode ser mais lento do que os outros métodos de otimização, aumentando o custo operacional. Além disso, o seu desempenho deve ser avaliado pelo resultado médio entre as execuções para um mesmo problema, pois é considerado um método estocástico que combina mudanças aleatórias com processos probabilísticos (MACHADO, 2006).

2.3 Regras de Operação de Reservatórios

A operação de um sistema hídrico consiste em determinar um conjunto de alocações de água ao longo do tempo, que tem como objetivos maximizar ou minimizar uma ou mais funções objetivos. Estas alocações dependem da quantidade de água armazenada, das demandas, das restrições do sistema, dos custos empregados na operação, e do volume de água afluente ao reservatório no futuro, o que torna este último um grande risco no processo de operação. Além do mais, quanto maior a complexidade do sistema (e.g., reservatórios de múltiplos usos), maiores são as dificuldades para o ser humano elaborar estratégias de operação, entender o funcionamento do sistema, e até mesmo simular o seu comportamento diante de regras pré-definidas (BARROS et al., 2008).

Para isso, a utilização de ferramentas computacionais com base matemática vem sendo amplamente difundida, com vistas a simular o comportamento do sistema e ser útil na construção de regras operacionais como suporte no processo de decisão. Estas regras geralmente são estabelecidas a partir de técnicas de simulação e otimização que levam em consideração a vazão afluente, as características do sistema e políticas anteriormente desenvolvidas (BARROS et al., 2008; BRAVO; COLLISCHONN; PILAR, 2005).

Existem diferentes regras de operação, mas as principais são os volumes metas de acumulação, o zoneamento múltiplo e as curvas guia, sendo que todas possuem como objetivo indicar o armazenamento ou descarga alvo para determinados períodos de tempo, atendendo suas restrições e otimizando determinados objetivos (BRAVO; COLLISCHONN; PILAR, 2005; VIEIRA; SANTOS; CURI, 2010).

No entanto, a escolha de uma técnica ideal para operação de reservatórios irá depender das características do sistema, da disponibilidade dos dados, dos objetivos e das restrições especificadas. Em consequência, sua aplicação a sistemas hídricos simples até os mais complexos deverá proporcionar um ganho considerável no que diz respeito à capacidade de armazenamento dos reservatórios, os custos envolvidos na operação, além de auxiliar os operadores permitindo que novos critérios possam ser inseridos com mais simplicidade (BRAVO; COLLISCHONN; PILAR, 2005).

2.4 Economia de Recursos Hídricos

O valor econômico atribuído à água não foi determinado pela forma da lei. Por sua vez, a escassez é o que confere à água esse valor econômico. Todo recurso que seja insuficiente acaba por afetar as relações econômicas, sendo possível estimar o seu valor. A falta de água, quando vinculada ao atendimento das necessidades básicas do ser humano, promove uma busca por esse recurso cada vez mais longe, aumentando os custos e afetando diretamente os que sofrem com essa condição. Os que não possuem os meios para arcar com as despesas cada vez maiores, terão que utilizar outros elementos na busca por esse insumo, acarretando uma redução de suas produtividades. Em razão disso, as propriedades comprometidas se desvalorizarão, o que contribui diretamente na geração de alternativas para a estimativa do valor econômico da água (LANNA, 2008).

Diante do exposto, uma alternativa para se estimar o valor econômico da água seria a disposição a pagar pela água, do inglês *Willingness to Pay* (WTP), que segundo Lanna (2001, p. 61)

em uma definição não totalmente precisa sob o ponto de vista econômico, é o valor limite que um usuário pagaria por uma unidade adicional, na situação de suprimento em que se encontra. Ela está relacionada ao valor que o usuário atribui à satisfação adicional que receberá derivada do uso desta unidade (LANNA, 2001, p. 61).

Em uma série de estudos é possível verificar métodos de modelagem de escolha, avaliação contingente e custos diretos atribuídos pelos moradores à escassez de água como forma de examinar o impacto e as atitudes das pessoas diante das restrições impostas pela seca, assim como a sua WTP por uma quantidade adicional de água (HENSHER; SHORE; TRAIN, 2006).

Dessa maneira, a água para o consumo doméstico possui uma WTP alta quando o usuário se encontra em situações de extrema escassez, e relativamente baixa na medida em que estas necessidades são supridas e usos menos relevantes (e.g., piscinas, irrigação de jardins e lavagens de automóveis) são atendidos. Em se tratando da água como fator de produção, a WTP pode ser determinada pela renda incremental que o consumidor recebe por sua atividade produtiva, em função da unidade de água adicional utilizada. Porém, a WTP é controlada pelo clima, a geologia e a cultura, uma vez que diferentes condições naturais implicam em diferentes rendimentos pelo uso da água (HENSHER; SHORE; TRAIN, 2006; LANNA, 2001).

Um exemplo disso ocorre no Nordeste brasileiro, onde podemos ter altas WTP pela água para irrigação na medida em que seja realizada uma transformação agrícola, adotando cultivos de alto valor agregado, como frutas para exportação, tecnologias de irrigação mais econômicas e práticas de gerenciamento modernas. (LANNA, 2001).

3 METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

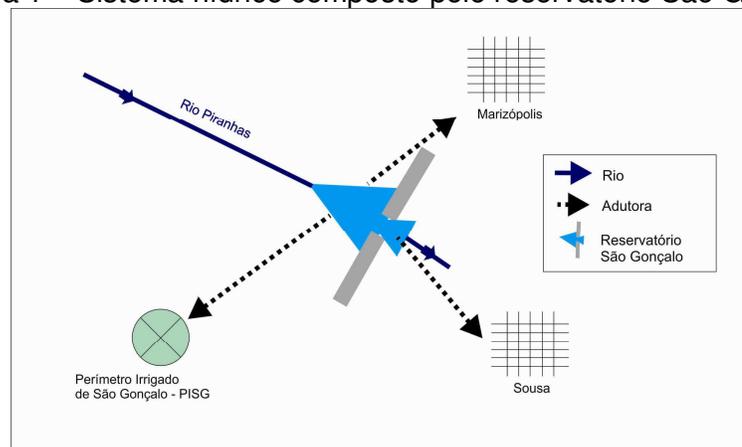
O sistema hídrico escolhido para aplicação dos procedimentos e modelos desenvolvidos nesta pesquisa é o Reservatório São Gonçalo, que está localizado na região semiárida do estado da Paraíba. Este açude encontra-se na bacia hidrográfica do Alto Piranhas, uma das sub-bacias do rio Piranhas.

A nascente do rio Piranhas abrange os municípios de Bonito de Santa Fé, Monte Horebe e São José de Piranhas, se estendendo 53,5 km ao norte para formar o açude São Gonçalo, nos municípios de Sousa e Nazarezinho.

A área de estudo apresenta clima quente e seco, vegetação típica de regiões semiáridas, e elevações que variam de 200 a 850 m. A temperatura média mensal da região, considerando dados das estações meteorológicas de São Gonçalo (Código 00638034) e Sousa (Código 00638036), é de 26,6 °C (FARIAS, 2004). A precipitação média anual na região da bacia é em torno de 800 mm, sobressaindo-se oito meses de estiagem seguidos por uma curta temporada de chuvas intensas (FARIAS, 2004; VIEIRA, 2011).

Na FIG. 1 encontra-se uma representação do sistema hídrico composto pelo reservatório São Gonçalo com os principais usuários de água e seu afluente.

Figura 1 – Sistema hídrico composto pelo reservatório São Gonçalo



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O açude de São Gonçalo, representado pelas FIG. 1 e FIG. 2, foi construído na década de 1930 e abastece as cidades de Sousa e Marizópolis, além de suprir as demandas hídricas do Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PISG). O Plano Diretor

de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PDRH – PB, 1997) apresenta dados técnicos referentes ao reservatório São Gonçalo, como mostrado na TAB.1.

Figura 2 – Visão panorâmica do Reservatório São Gonçalo – PB



Fonte: Foto registrada pelo autor (2013).

Tabela 1 – Dados referentes ao reservatório São Gonçalo – PB

Dados	São Gonçalo
Volume máximo (m ³)	44.600.000
Volume morto (m ³)	2.982.000
Área da bacia hidráulica (ha)	700
Área da bacia hidrográfica (km ²)	315
Vazão máxima do vertedor (m ³ /s)	1800

Fonte: PDRH-PB, 1997.

De acordo com o Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS), as demandas mensais para a finalidade de abastecimento urbano (Sousa e Marizópolis) e irrigação (PISG e Irrigação Difusa em São Gonçalo) do reservatório em estudo estão apresentadas na TAB. 2.

Tabela 2 – Demandas mensais do sistema São Gonçalo – PB (m³/s)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1,54	0,74	0,54	0,62	1,34	1,51	1,76	2,05	2,28	2,33	2,43	2,14

Fonte: DNOCS, 2013.

Tomando como base a pesquisa de SUDENE, 1990, *apud* VIEIRA, 2011¹, apresenta-se nas TAB. 3, 4 e 5 um resumo dos dados de precipitação, evaporação e vazão referentes ao reservatório São Gonçalo - PB.

Tabela 3–Precipitação média mensal em São Gonçalo – PB (mm)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
96,0	176,0	247,0	175,6	68,8	34,5	15,8	5,6	4,5	11,6	18,5	41,1

Fonte: SUDENE, 1990, *apud* VIEIRA, 2011¹.

Tabela 4 – Evaporação média mensal em São Gonçalo – PB (mm)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
183,0	157,2	141,6	136,0	144,8	144,9	168,6	200,1	215,9	223,2	216,0	206,0

Fonte: SUDENE, 1990, *apud* VIEIRA, 2011¹.

Tabela 5 – Vazão média mensal em São Gonçalo – PB (m³/s)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
0,10	0,84	3,88	5,06	2,42	0,84	0,16	0,01	0,00	0,01	0,02	0,04

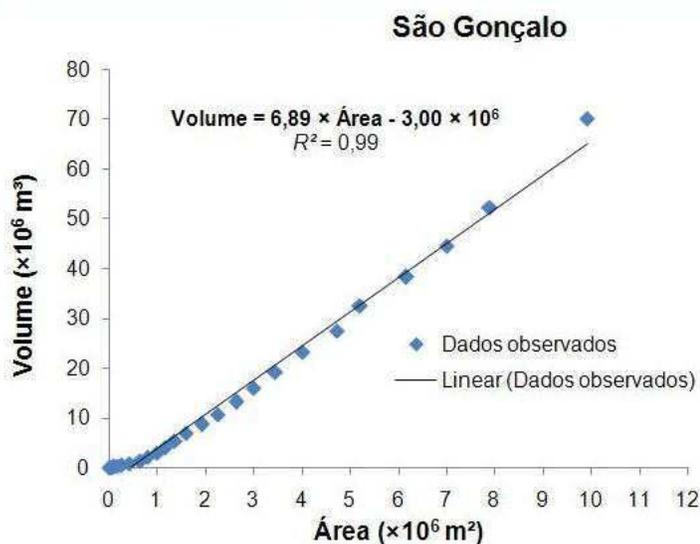
Fonte: PDRH-PB, 1997.

Os dados pluviométricos mensais apresentados na TAB. 3 foram obtidos a partir de postos pluviométricos próximos do sistema e com mais de trinta anos de dados (1933 - 1990).

As evaporações médias mensais, conforme mostrado na TAB. 4, foram obtidas de Tanques Classe A localizados em postos climatológicos nas vizinhanças do açude, onde se utilizou um coeficiente de correção de 0,75. Estas médias foram calculadas com base nos dados do período de 1969 a 1983.

Os valores de vazão média para o período de 1933 a 1989 e os dados referentes à curva área-volume, de acordo com a TAB. 5 e o GRAF. 1, respectivamente, foram extraídos do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PDRH – PB, 1997), que utilizou o modelo chuva-vazão MODHAC (Modelo Hidrológico Auto Calibrável) para geração das séries de vazões mensais afluentes ao respectivo reservatório. As tabelas contendo esses dados encontram-se disponíveis nos Anexos A e B.

Gráfico 1 – Curva Área x Volume do reservatório São Gonçalo – PB

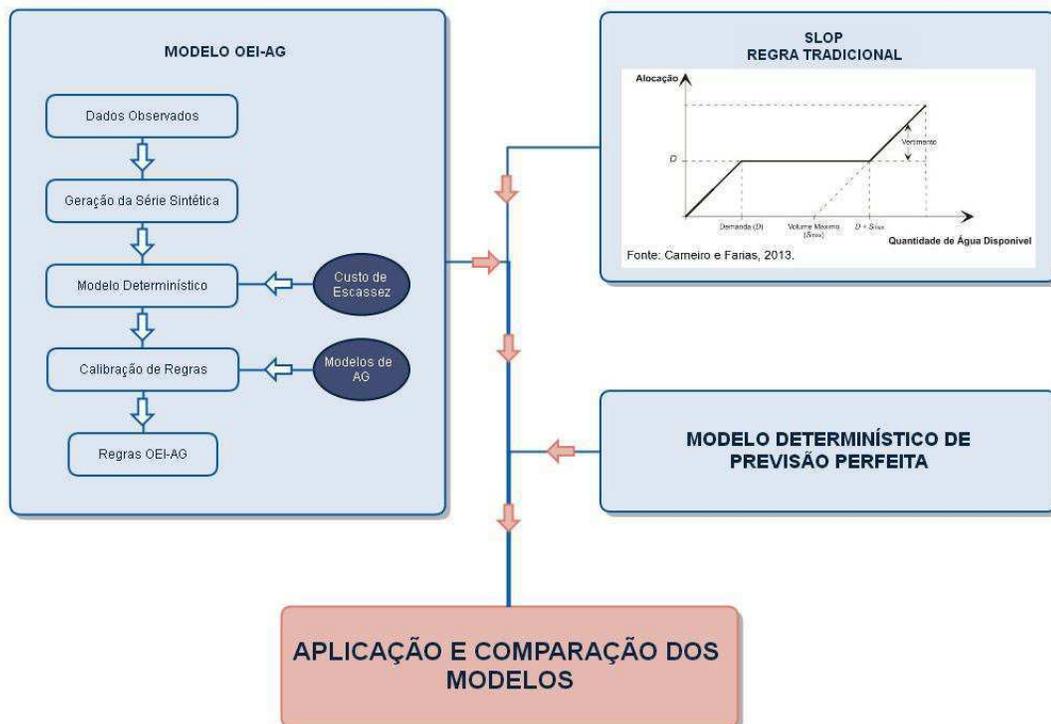


Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

3.2 Regras Operacionais

As etapas metodológicas para obtenção e comparação dos modelos utilizados neste estudo podem ser visualizadas na FIG. 3.

Figura 3 – Fluxograma representativo dos modelos utilizados nesta pesquisa

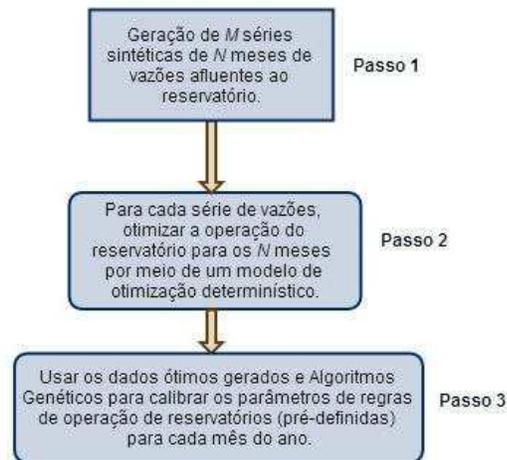


Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

3.2.1 Modelo OEI-AG

A combinação dos modelos de Otimização Estocástica Implícita e de Algoritmos Genéticos (OEI-AG) para calibração das regras de operação do reservatório São Gonçalo - PB consiste nas etapas apresentadas na FIG. 4.

Figura 4 – Fluxograma representativo do modelo OEI-AG



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Diferente do uso de análise de regressão para definir equações relacionando alocações com volumes iniciais do reservatório e vazões projetadas, este trabalho utiliza AG para calibrar fatores de racionamento discretos e volumes metas para cada mês do ano (FARIAS; TRIGUEIRO; KADOTA, 2014, no prelo).

3.2.1.1 Geração Estocástica de Vazões

Para aplicação do modelo de OEI, é necessária à implementação de um modelo para geração sintética de vazões afluentes ao reservatório São Gonçalo, que possuam propriedades estatísticas similares às dos dados observados. O modelo escolhido para este estudo é o Método dos Fragmentos (MF), inicialmente proposto por Svanidze (1980) e que vem sendo largamente utilizado (CARNEIRO; FARIAS, 2013; CELESTE et al., 2007; FARIAS; TRIGUEIRO; KADOTA, 2014, no prelo).

Este método desagrega vazões anuais em vazões mensais conforme um método padronizado (CELESTE et al. 2007). O primeiro passo consiste em calcular os fragmentos pela divisão das vazões mensais em um determinado ano pelo

somatório de todas as vazões mensais do respectivo ano, como pode ser visto na equação (1).

$$f(i,m) = \frac{Q(i,m)}{\sum_{j=1}^{12} Q(i,m)} \quad (1)$$

onde $f(i,m)$ e $Q(i,m)$ são, respectivamente, o fragmento e a vazão do mês m do ano i .

O segundo passo é investigar a correlação linear no conjunto de vazões anuais observadas e, em caso de dependência serial, utilizar modelos estatísticos para obter uma série de resíduos independentes. Após isso, a série de resíduos é modelada por uma função de densidade de probabilidade (fdp) apropriada.

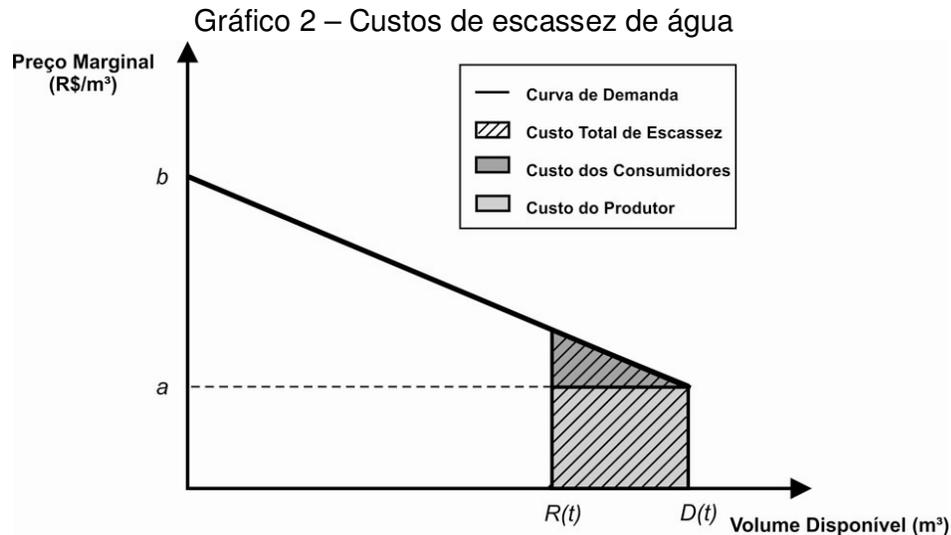
Qualquer nova geração de vazões anuais pode ser obtida por meio da simulação de números aleatórios utilizando a fdp modelada e subsequente aplicação da função inversa usada para remover a correlação da série. Por fim, as vazões anuais geradas são desagregadas seguindo o procedimento descrito em Celeste et al. (2007). Este procedimento consiste em estabelecer classes para as vazões anuais observadas, que são classificadas em ordem crescente. A primeira classe tem um limite inferior igual a zero e a última classe tem um limite superior igual a infinito. As classes intermediárias são definidas pela média entre duas sucessivas vazões anuais. Cada nova vazão anual sintética irá pertencer a uma classe específica e, portanto, as vazões mensais são obtidas através da multiplicação dos fragmentos de tal classe pelo valor anual sintético (FARIAS; TRIGUEIRO; KADOTA, 2014, no prelo).

Svanidze (1980) e Celeste et al. (2013) fornecem explicações mais detalhadas sobre o MF.

3.2.1.2 Modelo Determinístico

O preço de uma quantidade adicional de água está diretamente relacionado com o grau de racionamento, sendo representado neste estudo conforme o GRAF. 2. A perda dos produtores é resultante da alocação reduzida de água $R(t)$ durante períodos t de escassez e conseqüente não arrecadação das taxas correspondentes ao recurso não disponibilizado. Os efeitos econômicos sobre os vários usuários representa a perda dos consumidores pelo não atendimento da demanda $D(t)$. A

curva de demanda pode então ser definida pela relação entre a quantidade de água disponível e a mudança percentual no seu preço.



A estimativa de custos de escassez pode ser encontrada por meio da integração da curva de demanda, mostrada no GRAF. 3, entre a respectiva liberação de água $R(t)$ e a demanda $D(t)$, conforme a equação (2):

$$\begin{aligned} \text{CUSTO}(t) &= \int_{R(t)}^{D(t)} \left[\frac{(a-b) \cdot R(t)}{D(t)} + b \right] dR = \\ &= \frac{(b-a)}{2D(t)} \cdot R(t)^2 - b \cdot R(t) + (a+b) \cdot \frac{D(t)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

em que t é o período de tempo; e a e b são constantes equivalentes aos preços marginais mínimos e máximos de água, respectivamente.

O modelo determinístico utilizado nesse estudo assume que o principal objetivo da operação é encontrar alocações de água que melhor satisfazem as demandas sem comprometer o sistema. A formulação do problema de otimização está mostrada na equação (3):

$$\text{minimizar } \sum_{t=1}^N \text{CUSTO}(t) \quad (3)$$

onde N é o horizonte de operação.

Alocações e volumes de cada período são relacionados com vazão afluente, evaporação e vertimento pela equação da continuidade:

$$\begin{aligned} S(1) &= S_0 + Q(1) - R(1) - Ev(1) + P(1) - Sp(1) \\ S(t) &= S(t-1) + Q(t) - R(t) - Ev(t) + P(t) - Sp(t); \quad \text{para } t = 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

em que $S(t)$ é o volume do reservatório no final do período t ; S_0 é o volume inicial; $Q(t)$ é a vazão afluente ao sistema durante o período t ; $Ev(t)$ é o volume evaporado do reservatório durante o período t ; $P(t)$ é o volume de precipitação sobre a superfície líquida do reservatório durante o período t ; e $Sp(t)$ é o vertimento que eventualmente pode ocorrer durante o período t .

As limitações físicas do sistema definem as restrições para alocações, volume, vertimento, evaporação e precipitação:

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

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

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

$$Ev(t) \geq 0; \quad \forall t \quad (8)$$

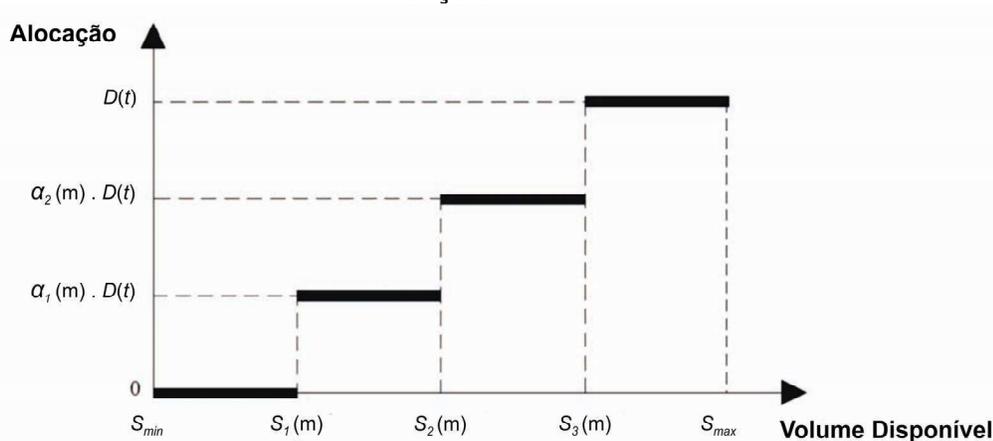
$$P(t) \geq 0; \quad \forall t \quad (9)$$

onde S_{\max} e S_{\min} são os volumes máximo e mínimo do reservatório, respectivamente.

3.2.1.3 Calibração das Regras de Operação

As alocações ótimas obtidas pelo modelo determinístico são relacionadas com o volume de água disponível (volume inicial do reservatório mais vazão esperada para o mês atual) por meio de regras mensais discretas de acordo com o GRAF. 3. Os fatores de racionamento $\alpha_1(m)$ e $\alpha_2(m)$, e os volumes metas $S_1(m)$, $S_2(m)$ e $S_3(m)$ para cada mês m ($m = \text{janeiro, fevereiro, ..., dezembro}$) são calibrados por modelos baseados em AG. Assim, a liberação para qualquer condição de volume inicial do reservatório e vazão esperada para o mês corrente pode ser estabelecida pelo acesso à regra correspondente (FARIAS; TRIGUEIRO; KADOTA, 2014, no prelo).

Gráfico 3 – Representação das regras mensais para operação do reservatório São Gonçalo - PB



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

3.2.1.4 Modelo de AG

O principal objetivo do modelo AG é encontrar os parâmetros $\alpha_1(m)$, $\alpha_2(m)$, $S_1(m)$, $S_2(m)$ e $S_3(m)$, para cada mês m , que minimiza a soma quadrada dos erros entre alocações ótimas e calculadas, realizando dez simulações para cada série de AG, para que sejam geradas as melhores soluções. As equações seguintes descrevem a formulação matemática do modelo AG para cada mês m :

$$\min \sum_{t=1}^N [R(t) - R_{cal}(t)]^2 \quad \forall t \in m \quad (10)$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} R_{cal}(t) &= D(t); \\ \text{se } S_3(m) &\leq S_D(t) \leq S_{max} \quad \forall t \in m \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} R_{cal}(t) &= \alpha_2(m) \cdot D(t); \\ \text{se } S_2(m) &\leq S_D(t) \leq S_3(m) \quad \forall t \in m \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} R_{cal}(t) &= \alpha_1(m) \cdot D(t); \\ \text{se } S_1(m) &\leq S_D(t) \leq S_2(m) \quad \forall t \in m \end{aligned} \quad (13)$$

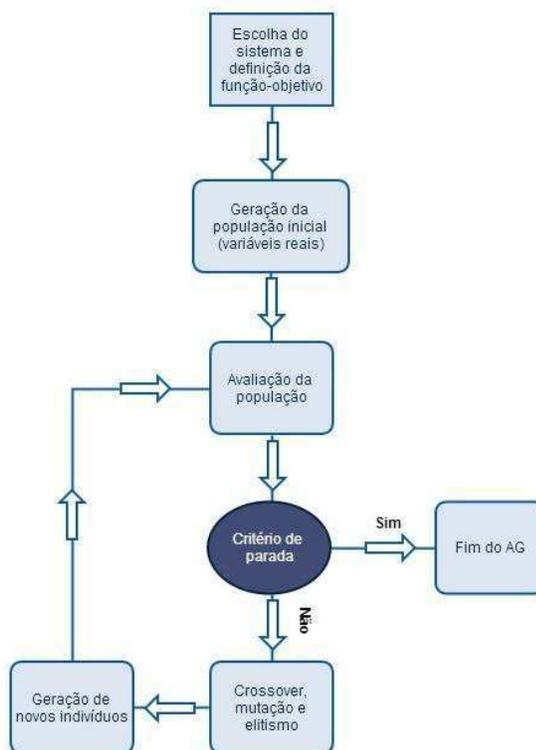
$$\begin{aligned} R_{cal}(t) &= 0; \\ \text{se } S_{min} &\leq S_D(t) \leq S_1(m) \quad \forall t \in m \end{aligned} \quad (14)$$

$$S_{min} \leq S_1(m) \leq S_2(m) \leq S_3(m) \leq S_{max} \quad \forall m \quad (15)$$

$$0 \leq \alpha_1(m) \leq \alpha_2(m) \leq 1 \quad \forall m \quad (16)$$

em que $R_{cal}(t)$ é a alocação calculada para o período de liberação t ; e $S_D(t)$ é a água disponível no reservatório no momento t , que corresponde ao armazenamento do reservatório inicial $S(t-1)$ mais a vazão no período corrente $Q(t)$.

Figura 5 – Fluxograma representativo do modelo de AG



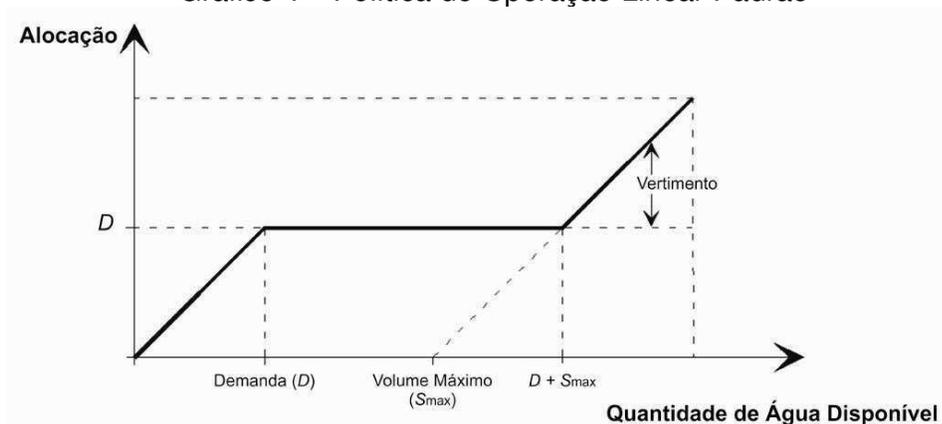
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Todos os modelos desse estudo foram implementados na linguagem de programação MATLAB, versão R2013a.

3.2.2 SLOP

Dessa maneira, uma das regras de operação mais simples é a Política Operacional Linear Padrão, do inglês *Standard Linear Operation Policy* (SLOP). Este modelo de simulação estabelece que quando a água disponível é igual ou inferior à demanda, toda a água armazenada é liberada, e quando a água disponível é superior à demanda, a mesma é atendida e o excedente vai se acumulando no reservatório até que o seu volume máximo seja atingido e o derramamento se inicie, conforme demonstrado no GRAF. 4 (CELESTE, 2004; LOUCKS et al., 1981).

Gráfico 4 – Política de Operação Linear Padrão



Fonte: Carneiro e Farias, 2013.

3.2.3 Modelo Determinístico de Previsão Perfeita

Este modelo consiste na aplicação do modelo determinístico da seção 3.2.1.2 considerando conhecidas as vazões afluentes ao reservatório para todo o horizonte de operação.

4 APLICAÇÃO E RESULTADOS

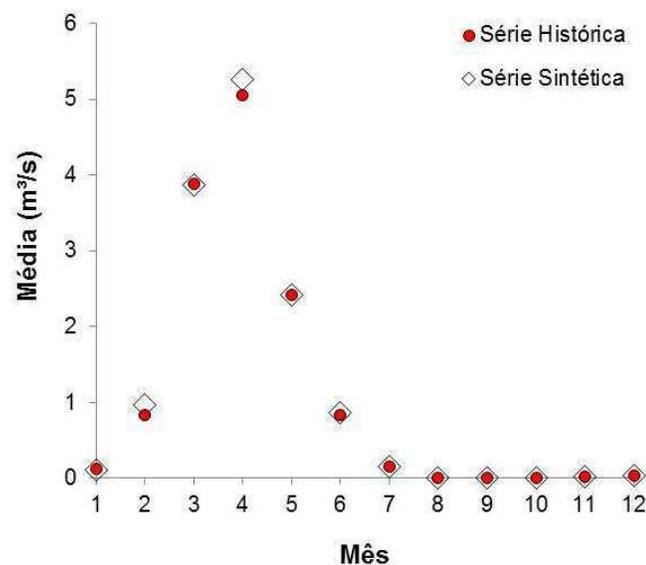
A série de dados utilizada para calibração e teste dos modelos são as vazões mensais do reservatório São Gonçalo – PB, obtidas junto ao PDRH – PB (1997). O período de 50 anos (1933 – 1982) foi utilizado para fins de calibração, enquanto sete anos (1983 – 1989) foram usados para testar as novas regras.

4.1 Geração Estocástica de Vazões

O MF foi calibrado e testado na geração de 1.000 anos de vazões sintéticas mensais e suas estatísticas foram comparadas com as estatísticas observadas nas vazões históricas (1933-1982).

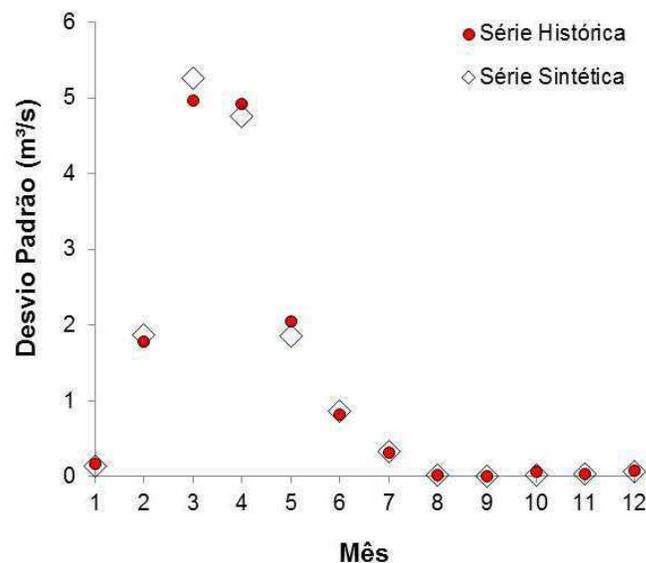
As estatísticas (médias e desvios padrões) das vazões geradas pelo MF foram bastante satisfatórias quando se faz uma comparação com as das vazões históricas, como pode ser visto pelos GRAF. 5 e GRAF. 6.

Gráfico 5 – Comparação entre as médias da série sintética obtida pelo MF com os valores das médias da série histórica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Gráfico 6 – Comparação entre os desvios padrão da série sintética obtida pelo MF com os valores dos desvios padrão da série histórica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Ao analisar os resultados, percebe-se que as vazões sintéticas possuem propriedades estatísticas similares às dos dados históricos, indicando que a este tipo de modelo é adequado para simulação estocástica de vazões para esta região.

4.2 Regras Operacionais OEI-AG

As regras operacionais OEI-AG, ou simplesmente modelo OEI-AG, foram aplicadas para operação do reservatório São Gonçalo- PB.

O volume inicial do reservatório foi assumido como sendo igual ao volume máximo. O modelo determinístico foi aplicado para otimizar a operação do reservatório considerando $M = 100$ sequências de $N = 1248$ meses (104 anos) de vazões afluentes ao reservatório, que foram geradas pelo MF. Os primeiros e últimos dois anos de cada sequência foram eliminados para evitar problemas com condições de contorno, resultando em um total de 120.000 meses (100 sequências de 100 anos) de alocações ótimas. Com relação à estimativa dos custos de escassez, os valores de $a = \text{R\$ } 2,25/\text{m}^3$ e $b = \text{R\$ } 12,08/\text{m}^3$ foram utilizados para representar o preço marginal da água cobrado pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA – 2013) em época de abastecimento normal e o valor em média cobrado por abastecimento com carros pipa em períodos de seca, respectivamente.

Os dados ótimos de volume disponível (volume inicial mais vazão afluyente) e alocação para os meses de janeiro a dezembro foram agrupados para calibração de 12 regras discretas de operação por meio de modelos de AG, uma para cada mês. Esse procedimento foi realizado durante 10 vezes a fim de diminuir as chances das soluções serem mínimos locais. A população inicial (valor fixo durante as gerações) para cada AG desenvolvido foi igual a 20 indivíduos e a estratégia de elitismo foi adotada em 10% da população para evitar a perda das melhores soluções. As soluções restantes foram submetidas a transformações do tipo *crossover* e mutação com frações de 80% e 20% da população, respectivamente. As calibrações tinham como limite de parada um valor menor que 10^{-6} na diferença entre o valor da função objetivo considerando a melhor solução anterior e o valor da função na atual solução “ótima”. Os valores dos parâmetros de racionamento e dos volumes metas que disparam esses racionamentos para cada mês do ano podem ser vistos pela TAB. 6.

O desempenho do modelo OEI-AG foi verificado em dez novas simulações com base em dez novas sequências geradas pelo MF, cada uma com 104 anos de vazões mensais afluentes ao reservatório São Gonçalo. Assim como na calibração, os primeiros e últimos dois anos de cada sequência foram eliminados para evitar problemas com condições de contorno, resultando em um total de 100 anos (1200 meses) de operação para cada sequência. Para fins de comparação, os resultados obtidos pela aplicação do modelo de otimização determinístico e pelo SLOP também foram avaliados. Os resultados econômicos para todas as simulações e modelos, assumido como sendo igual ao somatório dos custos para todo o horizonte de operação, conforme função objetivo da equação (3), podem ser vistos na TAB. 7. Esses resultados representam o valor econômico (custo) das falhas ao atendimento das demandas do sistema levando-se em conta todo o horizonte de operação.

Tabela 6 – Critérios de racionamento de água e volumes para disparo de racionamento

Mês	α_1	α_2	$S_1(\times 10^6 \text{ m}^3)$	$S_2(\times 10^6 \text{ m}^3)$	$S_3(\times 10^6 \text{ m}^3)$
Janeiro	0,83	0,95	4,11	8,70	27,47
Fevereiro	0,84	0,94	2,98	5,25	13,29
Março	0,33	0,93	3,28	3,75	19,18
Abril	0,82	0,88	2,98	3,25	17,02
Mai	0,58	0,94	3,64	3,64	37,59
Junho	0,38	0,63	2,98	3,65	5,71
Julho	0,86	0,86	2,98	3,54	17,67
Agosto	0,04	0,85	4,12	6,48	17,14
Setembro	0,47	0,84	3,47	7,99	16,84
Outubro	0,45	0,83	3,34	3,63	16,05
Novembro	0,04	0,86	6,17	7,02	18,05
Dezembro	0,24	0,83	3,02	5,87	13,95

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Custo da escassez de água, em bilhões de reais, para 10 novas simulações de 100 anos considerando todos os modelos.

	Modelo Determinístico	SLOP	Modelo OEI-AG
SIM#1	1,08	1,68	1,41
SIM#2	0,60	0,95	0,82
SIM#3	1,34	1,94	1,78
SIM#4	0,65	1,00	0,90
SIM#5	0,99	1,46	1,35
SIM#6	0,65	1,02	0,88
SIM#7	1,22	1,82	1,60
SIM#8	0,67	1,01	0,90
SIM#9	0,80	1,18	1,03
SIM#10	1,01	1,55	1,34

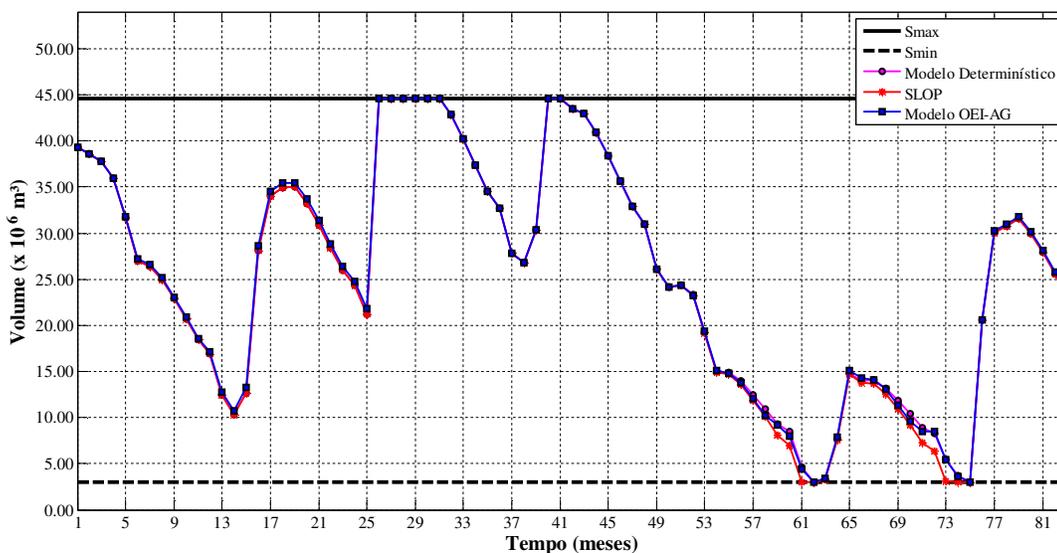
Fonte: Autoria própria.

Uma investigação dos resultados apresentados na TAB.7 mostra que o uso das regras do modelo OEI-AG resultou em falhas com menores custos quando comparadas às geradas pelo uso do SLOP para todas as simulações.

Uma simulação dos modelos com vazões reais de 1983 a 1989 foi também conduzida e os resultados podem ser visualizados pelos GRAF. 7 e GRAF. 8.

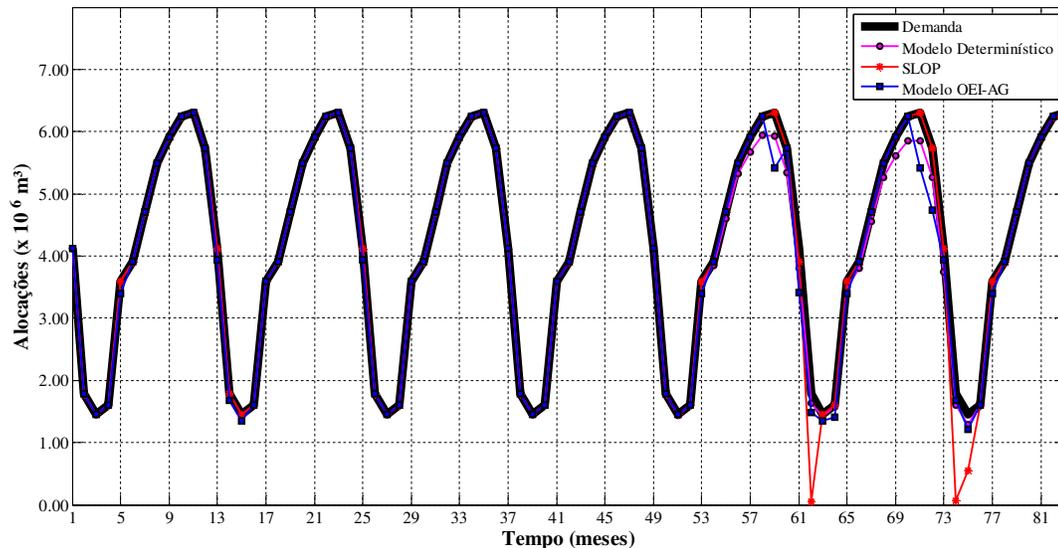
O modelo de regras discretas OEI-AG, de acordo com os GRAF. 7 e GRAF. 8, procura mitigar os déficits concentrados que acontecem com o SLOP, diminuindo as alocações antes da chegada dos períodos secos e, conseqüentemente, a magnitude destes déficits. Observa-se, também, que as alocações do modelo OEI-AG tentam se comportar de maneira similar as do modelo determinístico, indicando que os resultados derivados são satisfatórios, uma vez que o modelo OEI-AG se espelha nesse modelo de previsão perfeita, que conhece as vazões para todo o horizonte de operação.

Gráfico 7– Volumes do reservatório para operação entre 1983 – 1989 com todos os modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Gráfico 8– Alocações de água para operação do reservatório entre 1983 – 1989 com todos os modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

É importante destacar que na análise realizada, como mostram os GRAF. 7 e GRAF. 8, foi observado situações em que o volume do reservatório atinge o seu volume morto para o horizonte operacional testado em todos os modelos. Esse fator pode ser explicado pelos altos níveis de demanda na região provocados pelo crescimento populacional e o desenvolvimento econômico, principalmente, o aumento de atividades agrícolas. Ainda assim, do ponto de vista econômico, o modelo determinístico e o modelo OEI-AG foram superiores ao SLOP, pois tentam diminuir as alocações antes dos períodos secos a fim de reduzir a dimensão dos déficits e, por conseguinte, evitar o colapso dos atendimentos às demandas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa teve como principal objetivo desenvolver e aplicar regras de operação mensal para o reservatório São Gonçalo, que está localizado no semiárido nordestino. Para isso, regras mensais foram obtidas por meio da combinação das técnicas de Otimização Estocástica Implícita (OEI) e Algoritmos Genéticos (AG).

A geração sintética de vazões de entrada ao reservatório foi realizada por meio do Método dos Fragmentos, onde se evidenciou a sua aplicabilidade para esse tipo de problema.

Com base em critérios econômicos associados à escassez de água, os resultados obtidos sugerem que as regras OEI-AG são superiores a política de operação padrão e inferiores ao modelo determinístico. No entanto, é importante enfatizar que o modelo determinístico necessita conhecer todo o horizonte de operação, enquanto o modelo OEI-AG necessita apenas de informações sobre o volume inicial e de vazão afluente para o mês corrente.

Sendo assim, espera-se que este modelo sirva como suporte na tomada de decisão durante a operação mensal do reservatório São Gonçalo, assim como para operação sustentável de sistemas hídricos no semiárido.

Em relação ao procedimento indicado nesta pesquisa, não foram consideradas quaisquer externalidades para os usos irrigação e piscicultura. Seria de grande importância que trabalhos futuros aliassem, em seus objetivos principais, uma análise mais detalhada dos múltiplos usos para comparar o valor dos recursos hídricos presentes nessas ou em demais atividades econômicas desenvolvidas na região.

Além disso, seria interessante que trabalhos posteriores adotassem procedimentos para construção das curvas de demanda para cada uso, visando o aprofundamento dos estudos em relação à realidade produtiva da região analisada, notadamente obtendo informações sobre as variáveis econômicas envolvidas.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, T. G. **Transposição das Águas do rio São Francisco para a Bacia do rio Paraíba**: Uma avaliação da Sinergia e sustentabilidade Hídrica utilizando o modelo de Rede de Fluxo ACQUANET. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

BARROS, F. V. F.; MARTINS, E. S. P. R.; JUNIOR, D. S. R.; ALVES, C. de M. A. Desenvolvimento do módulo de operação de sistema de reservatórios no sistema de informações para gerenciamento da alocação de água – SIGA. In: **Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. 2008. P. 16.

BATISTA, R. L. **Planejamento da utilização da água de um sistema hídrico: um estudo de caso no reservatório São Gonçalo – Sousa/PB**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) - Universidade Federal de Campina Grande, Sousa, 2013.

BRASIL. Decreto Lei Federal Nº 24.643, de 10 de Julho de 1934. Código de Águas. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D24643.htm>. Acessado em: 01 de fev. de 2014.

BRASIL. Decreto Lei Federal Nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.HTM>. Acessado em: 01 de fev. de 2014.

BRASIL. Decreto Lei Federal Nº 9.984 de 17 de Julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm>. Acessado em: 01 de fev. de 2014.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V. Otimização da Operação de Reservatórios: Estado-da-Arte. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa, 2005, CD-ROM.

CARNEIRO, T. C.; FARIAS, C. A. S. Otimização Estocástica Implícita e Redes Neurais Artificiais para Auxílio na Operação Mensal dos Reservatórios Coremas - Mãe d'Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2013.

CELESTE, A. B. **Optimal Real-time Operation of a Multipurpose Water Resource System Using Genetic Algorithms**. 2002. M.Sc. Dissertation, 147 p., Ehime University, Matsuyama, Ehime, Japan, 2002.

CELESTE, A. B., K. et al. **Stochastic generation of inflow scenarios to be used by optimal reservoir operation models**. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 48(1), 2004. p. 451-456.

CELESTE, A. B. et al. **Derivation of reservoir operating rules by implicit stochastic optimization**. Annual Journal of Hydraulic Engineering – JSCE 49(2), 2005. p. 1111–1116.

CELESTE, A. B.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Análise de métodos para geração sintética de vazões em rios intermitentes. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007, São Paulo. p. 1-18.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA A SECA – DNOCS. 2013. In: **Entrevista de dados hidrológicos concedida a Valterlin da Silva Santos**. 2013.

FARIAS, S. R. A. **Operação integrada dos reservatórios Engenheiro Avidos e São Gonçalo**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

FARIAS, C. A. S. et al. Use of Monte Carlo optimization and artificial neural networks for deriving reservoir operating rules. **Annual Journal of Hydraulic Engineering**, JSCE, 50(1), 2006. p. 25-30.

FARIAS, C. A. S. **Derivation of hedging rules and forecasts by artificial neural networks for optimal real-time management of an integrated water resources system**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia), Ehime University, Matsuyama, Japão, 2009.

FARIAS, C. A. S.; TRIGUEIRO, H. O.; KADOTA, A. Use of implicit stochastic optimization and genetic algorithms for deriving reservoir hedging rules. **Annual Journal of Hydraulic Engineering**, JSCE, v. 58, fev. 2014. No Prelo.

FONTANE, D.; GATES, T.; MONCADA, E. Planning reservoir operations with imprecise objectives. **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, 123(3), 1997. p. 154–162.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison Wesley, Reading, USA, 1989.

HENSHER, D.; SHORE, N.; TRAIN, K. Water Supply Security and Willingness to Pay to Avoid Drought Restrictions. **The Economic Record**, vol. 82, n. 256, p. 56–66, mar 2006.

HOLLAND. J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. MIT Press, 1975.

KUMAR, D. N.; REDDY, M. J. **Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation**. **Water Resources Management**, v. 20, p. 879-898, 2006.

LOGAR I.; BERGH, J. C. J. M. **Methods to Assess Costs of Drought Damages and Policies for Drought Mitigation and Adaptation**: Review and Recommendations. *Water Resources Management*, vol. 7, p. 1707-1720, 2013.

LANNA, A. E. “Gestão dos Recursos Hídricos”, in **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 3ª ed., cap. 19, p. 727 – 768, 2002.

LANNA, A. E. A economia dos recursos hídricos: os desafios da alocação eficiente de um recurso (cada vez mais) escasso. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p.113-130, 2008.

LANNA, A. E. **Economia dos recursos hídricos**. 2001. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. *Water Resources Systems Planning and Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA, 1981.

LOUCKS, D. P. et al. 2005. **Water Resources Systems Planning and Management**: An Introduction to Methods, Models and Applications. Delft Hydraulics, The Netherlands, USA, 2005.

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

MELO, D. M. **Estudo da otimização do uso dos recursos hídricos dos açudes Bruscas, Cachoeira dos Alves, Saco de Nova Olinda, Canoas e Queimadas na bacia do rio Piancó – PB**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

MICHALEWICZ, Z. **Genetics Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer, 3th ed, 1999.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Relatório de Impacto sobre o Meio Ambiente do Projeto de integração do rio São Francisco com bacias hidrográficas do nordeste setentrional**. Brasília, DF, jun. 2004. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/saofrancisco/rima/download.asp>>. Acesso em: 01 de fev. 2014.

NEELAKANTAN, T. R.; PUNDARIKANTHAN, N. V. **Hedging Rule Optimisation for Water Supply Reservoirs System**. *Water Resources Management*, v. 13, p. 409–426, 1999.

SCIENTEC, Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba**: Diagnóstico do Estado – Estudo de base das bacias do rio Piancó e Alto Piranhas, disponível em CD-ROM, João Pessoa, PB, 1997.

RIGHETTO, A. M., GUIMARÃES JR., J.A., MATTOS, A. Indução de Sinergia hídrica no reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. RN. In: **Anais do V Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2000.

ROBERTO, A. N. **Modelos de rede de fluxo para alocação da água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

ROSAL, M. C. F. **Programação Não-linear aplicada à otimização de redes pressurizadas de distribuição de água**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

SANTOS, V. S. **Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistemas de Recursos Hídricos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2ª ed. – Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

SUDENE, Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste** – Estado da Paraíba. Série pluviométrica 5. Recife, PE, 1990.

SVANIDZE, G. G. **Mathematical Modeling of Hydrologic Series** (for Hydroelectric and Water Resources Computations). Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, 1980.

TU, M. Y.; HSU, N. S.; YEH, W. W. G. Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 2, p. 86-97, mar. 2003. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:2\(86\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:2(86))>. Acesso em: 29/01/2013.

VIEIRA, A. S. **Um modelo de simulação via programação linear sequencial, para sistema de recursos hídricos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

VIEIRA, A. S.; SANTOS, V. S; CURI, W. F. Escolha das regras de operação racional para subsistema de reservatórios no semiárido nordestino. *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*, v. 7, n. 1, p. 037-050, jan. /mar. 2010.

¹VIEIRA, A. S. **Modelo de Simulação Quali-quantitativo Multiobjetivo para o Planejamento Integrado dos Sistemas de Recursos Hídricos**. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

WILLIS, R., FINNEY, B. A.; CHU, W. S. Monte Carlo optimization for reservoir operation, *Water Resources Research*, 20(9), 1984. p. 1177-1182.

YOUNG, G. K., Jr. **Finding reservoir operating rules.** Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 93(HY6), 1967. p. 297-321.

ANEXO A

Dados de vazão gerados pelo modelo MODHAC - 1933 à 1989.

Ano	VAZÕES MÉDIAS MENSAIS (m ³ /s)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1933	0,27	0,6	0,55	2,23	2,85	0,97	0,01	0	0	0	0,08	0,04
1934	0,12	0,49	7,95	4,58	5,18	2,15	0,49	0	0	0	0,01	0,09
1935	0,02	6,08	12,3	12,57	4,16	3,28	1,37	0,07	0	0	0	0
1936	0,03	0,39	0,78	0,5	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0
1937	0	0,59	2,47	9,59	2,62	0,92	0,03	0	0	0	0	0
1938	0,01	0,16	1,44	7,23	2,72	0,99	0,01	0	0	0	0	0
1939	0,01	0,24	3,59	3,2	1,99	0,32	0	0	0	0,01	0	0,01
1940	0,95	1,35	2,51	3,25	4,89	2,64	0,82	0	0	0	0	0
1941	0	0,32	6,38	3,5	2,04	0,33	0	0	0	0	0,06	0
1942	0	0,1	0,01	0,67	0,31	0	0	0	0	0,48	0,01	0,15
1943	0,03	0,07	0,61	2,28	1,08	0,04	0	0	0	0	0,01	0,03
1944	0,02	0	1,14	3,09	2,43	0,79	0,01	0	0	0	0	0,09
1945	0,27	0,09	0,59	1,02	2,58	2,16	0,37	0	0	0,01	0	0
1946	0,05	0,57	0,07	0,17	0,22	0,04	0,02	0,04	0	0	0,15	0,17
1947	0,14	1,52	6,23	10,01	2,24	0,35	0	0	0	0	0,13	0,04
1948	0,01	0,06	1,22	4,31	2,51	0,66	0	0	0	0	0	0,09
1949	0	0,19	0,44	1,74	1,72	1,46	0,13	0,02	0	0	0,07	0,41
1950	0,01	0,02	0,63	6,15	2,44	0,47	0	0	0	0	0	0
1951	0,09	0,05	0,01	0,21	0,49	0	0	0	0	0,04	0	0,11
1952	0,03	0,17	0,72	1,42	1,73	0,67	0,01	0	0	0	0	0,14
1953	0	0,01	0,34	0,11	0,11	0,49	0,05	0	0	0	0	0
1954	0,39	2,22	6,38	8,76	2,5	0,83	0,01	0	0	0	0,01	0,09
1955	0,06	0,55	8,13	5	1,93	0,27	0	0	0	0	0	0,02
1956	0,01	2,5	2,62	2,96	1,83	0,22	0,03	0	0	0,01	0	0
1957	0,11	0,01	1,15	11,66	2,23	0,34	0	0	0	0	0	0
1958	0	0,11	0,36	1,1	0,05	0	0	0	0	0	0	0
1959	0,28	0,77	2,71	2,8	1,15	0,18	0,02	0	0	0	0,01	0
1960	0,08	0,01	13,65	3,19	1,35	0,23	0	0	0	0	0	0
1961	0,24	1,53	1,2	6,75	2,44	0,57	0	0	0	0	0	0
1962	0,01	0,23	1,33	4,84	2,04	0,66	0,03	0	0	0	0	0,05
1963	0,05	0,35	18,93	3,13	2,15	0,38	0,01	0	0	0	0,01	0,02
1964	0,03	0,5	0,73	1,49	2,02	1,47	0,16	0	0,01	0	0	0
1965	0,12	0,18	0,63	15,01	4,38	1,51	0,63	0	0	0,01	0	0
1966	0	0,68	0,56	0,03	0,08	0,23	0,01	0	0	0	0	0
1967	0,08	1,35	4,33	12,65	9,35	1,75	0,16	0	0	0	0	0,01
1968	0,03	0,04	11,53	3	1,83	0,34	0	0	0	0	0	0,01
1969	0,2	0,76	1,95	5,8	2,22	0,98	0,07	0	0	0	0	0
1970	0,21	0,16	2,25	2,32	1,24	0,05	0	0	0	0	0,01	0

Dados de vazão gerados pelo modelo MODHAC - 1933 à 1989. (Continuação)

Ano	VAZÕES MÉDIAS MENSAIS (m ³ /s)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1971	0,18	3,41	9,87	8,68	3,18	2,47	1,2	0,03	0	0,01	0	0
1972	0,21	0,61	1,97	1,87	1,36	0,33	0	0	0	0	0	0,27
1973	0,29	0,02	0,85	16,21	4,01	1,21	0,17	0	0	0	0	0
1974	0,09	0,95	5,46	17,44	3,56	1,27	0,09	0	0	0	0,09	0
1975	0,36	1,11	3,29	8,3	4,14	1,35	0,34	0	0	0	0	0
1976	0	0,47	0,98	1,17	0,07	0	0	0	0	0	0,01	0
1977	0,08	0,26	19,4	7,61	4,28	1,47	0,15	0	0	0	0	0,13
1978	0,19	0,94	2,37	0,84	0,73	0,07	0,01	0	0	0	0	0
1979	0,04	0,57	1,28	2,49	1,91	0,47	0	0	0	0	0	0
1980	0,12	0,65	15,56	1,66	0,27	0,02	0	0	0	0	0	0
1981	0,06	0,2	11,63	4,89	0,92	0	0	0	0	0	0,11	0,02
1982	0,02	0,02	1,24	0,87	2,35	0,75	0	0	0	0,02	0,11	0
1983	0,01	0,86	0,54	0,24	0	0	0	0	0	0	0	0
1984	0,01	0	1,52	6,75	3,81	2,16	0,32	0	0	0	0,02	0,04
1985	0,63	11,86	12,95	22,59	10,5	2,49	1,33	0,11	0	0	0	0,04
1986	0,06	0,62	2,08	8,2	4,82	1,47	0,19	0	0	0	0,02	0
1987	0,02	0,19	0,82	0,42	0	0	0,01	0,01	0	0	0	0
1988	0,02	0,05	0,67	2,34	4,07	1,3	0,05	0	0	0	0	0,07
1989	0,4	0	0,23	7,51	5,09	2,04	0,58	0	0,09	0,01	0	0,22

Fonte: PDRH – PB, 1997.

ANEXO B

São Gonçalo		
Cota (m)	Área (m²)	Volume (m³)
226	10.000	0
227	40.000	22.000
228	86.000	96.000
229	160.000	250.000
230	260.000	442.000
231	420.000	780.000
232	646.000	1.348.000
233	800.000	2.050.000
234	988.000	2.982.000
235	1.150.000	4.050.000
236	1.356.000	5.326.000
237	1.600.000	6.900.000
238	1.922.000	8.604.000
239	2.240.000	10.700.000
240	2.626.000	13.152.000
241	3.000.000	15.900.000
242	3.444.080	19.222.000
243	4.000.000	23.200.000
244	4.716.000	27.382.000
245	5.200.000	32.500.000
246	6.158.000	38.256.000
247	7.000.000	44.600.000
248	7.890.000	52.304.000
250	9.896.000	70.090.000

Fonte: PDRH – PB, 1997.