



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

JÚLIA DANIELE SILVA DE SOUZA

**SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO ESPACIAL PARA A GESTÃO  
INTEGRADA DE MÚLTIPLOS SISTEMAS ADUTORES**

Caruaru

2021

JÚLIA DANIELE SILVA DE SOUZA

**SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO ESPACIAL PARA A GESTÃO  
INTEGRADA DE MÚLTIPLOS SISTEMAS ADUTORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental.

**Orientador:** Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.

**Coorientador:** Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Caruaru

2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

S729s Souza, Júlia Daniele Silva de.  
Sistema de suportes à decisão espacial para a gestão integrada de múltiplos sistemas adutores. / Júlia Daniele Silva de Souza. – 2021.  
90 f.; il.: 30 cm.

Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra.

Coorientador: José Almir Cirilo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2021.

Inclui Referências.

1. Aquedutos - Pernambuco. 2. Otimização matemática. 3. Escassez. 4. Vazões naturais - Pernambuco. 5. Alocação de recursos - Pernambuco. 6. Estudos de viabilidade - Pernambuco. I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques (Orientador). II. Cirilo, José Almir (Coorientador). III. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2021-194)

JÚLIA DANIELE SILVA DE SOUZA

**SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO ESPACIAL PARA A GESTÃO  
INTEGRADA DE MÚLTIPLOS SISTEMAS ADUTORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 20 / 08 / 2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dra. Nyadja Menezes Rodrigues Ramos (Examinadora Externa)  
Companhia Pernambucana de Saneamento

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por todas as bênçãos em minha vida.

Aos meus pais, Luiz e Jane, que são a luz da minha vida e doaram-se por inteiro para que eu chegasse até aqui, sendo referenciais para mim de bondade, persistência, esforço e amor ao próximo.

À minha irmã, Laura, pela cumplicidade, amor e momentos de alegria compartilhados.

Aos amigos da UFPE, que sempre torceram por mim e foram importantes em momentos decisivos da minha vida, vocês foram suporte para mim e tornaram essa trajetória bem mais divertida.

Aos professores Saulo de Tarso Marques Bezerra e José Almir Cirilo, pelo suporte e orientação, tornando esse trabalho possível de ser realizado.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta etapa da minha vida.

## RESUMO

A escassez hídrica é um problema frequente em várias partes do mundo, usualmente causada ou ampliada por ações antropogênicas. Para aliviar os impactos da falta de água e garantir a eficaz alocação de recursos hídricos, a integração de múltiplas fontes de água tem sido uma alternativa viável, porém desafiadora para os gestores de recursos hídricos. Lidar com múltiplas fontes hídricas, por vezes água transferida e demandas conflitantes, requer um método de otimização multiprocessos que ofereça suporte à tomada de decisão. Assim, essa pesquisa objetiva desenvolver um sistema de suporte à decisão (SSD) para a definição de estratégias ótimas de operação de um conjunto de sistemas adutores de água no Agreste pernambucano. A metodologia proposta é capaz de minimizar os custos operacionais, considerando os cenários de disponibilidade de recursos hídricos e as limitações infraestruturais dos sistemas. Através do algoritmo de inteligência coletiva *particle swarm optimization* (PSO), é possível simular a operação do sistema integrado em curto e longo prazo, definindo um conjunto de vazões alocadas das fontes hídricas para os centros de consumo guiado por restrições econômicas, técnicas e hídricas. O estudo também buscou investigar a viabilidade das soluções sob condições externas distintas, analisando a influência do percentual inicial de acumulação dos reservatórios na análise e simulando duas dimensões de planejamento: o consumo atual (estimado em 2014) e a projeção para 2037. Os resultados mostram que a simulação de curto prazo permite obter resultados com menores custos operacionais em menor tempo de processamento computacional e que, apesar do reservatório Jucazinho ser a fonte mais utilizada na maioria dos cenários, o aporte da Adutora do Agreste é indispensável para suprimento da demanda, especialmente no horizonte de planejamento 2037. O método de inteligência coletiva PSO gerou resultados consistentes a boas taxas de convergência e a análise de cenários proporcionou alterações significativas nas simulações de curto prazo e, em menor grau, influenciou nos resultados obtidos na simulação de longo prazo. A utilização do SSD foi capaz de oferecer subsídios e parâmetros que facilitam a tomada de decisão, garantindo que o sistema opere de modo eficiente e sustentável.

**Palavras-chave:** Transferência de água entre bacias. Otimização. Escassez hídrica. Alocação de vazões.

## ABSTRACT

Water scarcity is a frequent problem in several parts of the world, usually caused or amplified by anthropogenic actions. To alleviate the impacts of water shortages and ensure the effective allocation of water resources, the integration of multiple water sources has been a viable, but challenging, alternative for water resource managers. Dealing with multiple water sources, sometimes transferred water and conflicting demands, requires a multi-process optimization method that supports decision making. Thus, this research aims to develop a decision support system (DSS) for the definition of optimal operating strategies for a set of water supply systems in Agreste Pernambuco. The proposed methodology is capable of minimizing operating costs, considering the scenarios of availability of water resources and the infrastructural limitations of the systems. Through the collective intelligence algorithm particle swarm optimization (PSO), it is possible to simulate the operation of the integrated system in the short and long term, defining a set of flows allocated from water sources to consumption centers guided by economic, technical and water restrictions. The study also sought to investigate the viability of the solutions under different external conditions, analyzing the influence of the initial percentage of reservoir accumulation in the analysis and simulating two planning dimensions: current consumption (estimated in 2014) and the projection for 2037. The results show that short-term simulation allows results to be obtained with lower operating costs in less computational processing time and, despite the Jucazinho reservoir being the most used source in most scenarios, the contribution of Agreste Conveyance System is indispensable to supply demand, especially in the planning horizon 2037. The collective intelligence method PSO generated consistent results at good convergence rates and the analysis of scenarios provided significant changes in short-term simulations and, to a lesser extent, influenced the results obtained in the long-term simulation. The use of DSS was able to offer support and parameters that facilitate decision making, ensuring that the system operates efficiently and sustainably.

**Keywords:** Interbasin water transfer. Optimization. Water scarcity. Flow allocation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Influência das parcelas de inércia, cognitiva e social no processo de busca.....	23
Gráfico 1 -	Distribuição dos artigos analisados em periódicos ao longo do tempo	27
Figura 2 -	Rede das principais referências fornecida pelo CiteSpace.....	28
Quadro 1 -	Métodos de otimização dos artigos analisados.....	30
Mapa 1 –	Localização da região Agreste do estado de Pernambuco, área de estudo do trabalho.....	37
Mapa 2 –	Sistema de dutos, canais, fontes e municípios analisados do Agreste pernambucano.....	40
Quadro 2 -	Características do reservatório Jucazinho.....	41
Quadro 3 -	Características do reservatório Prata.....	43
Fluxograma 1 -	Fluxograma da otimização de curto prazo.....	50
Fluxograma 2 -	Fluxograma da otimização de longo prazo.....	54
Figura 3 –	Regras operacionais dos reservatórios baseadas no armazenamento de água durante os meses do ano.....	58
Figura 4 -	Curvas-guia e cenários de operação dos reservatórios.....	61
Gráfico 2 –	Vazão máxima captável de Jucazinho para diferentes estados de armazenamento a cada mês.....	61
Gráfico 3 –	Volume acumulado em Jucazinho com o máximo aproveitamento de vazões captáveis.....	62
Gráfico 4 –	Vazão máxima captável do Prata para diferentes estados de armazenamento a cada mês.....	62
Gráfico 5 –	Volume acumulado no Prata com o máximo aproveitamento de vazões captáveis.....	63
Gráfico 6 –	Varição da alocação de vazões ao longo dos anos para o cenário 2 no horizonte de planejamento 2014 para os meses de fevereiro (a) e junho (b).....	65
Gráfico 7 –	Varição da alocação de vazões ao longo dos anos para o cenário 2 no horizonte de planejamento 2037 para os meses de fevereiro (a) e junho (b).....	66

Gráfico 8 –	Variação da alocação de vazões ao longo dos anos para o mês de outubro no horizonte de planejamento 2014 para os cenários 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	67
Gráfico 9 –	Vazões médias alocadas ao longo dos meses para os cenários 2 e 5, respectivamente, nos horizontes de planejamento 2014 (a, c) e 2037 (b, d).....	69
Gráfico 10 –	Variação dos custos operacionais para a simulação de curto prazo nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).....	70
Gráfico 11 –	Tempo de processamento para simulação de curto prazo em função da quantidade de iterações e partículas.....	72
Gráfico 12 –	Alocação média de vazões das fontes hídricas para os centros de consumo no horizonte de planejamento 2014 para os cenários 1 (a) e 4 (b).....	73
Gráfico 13 –	Alocação média de vazões das fontes hídricas para os centros de consumo no horizonte de planejamento 2037 para os cenários 2 (a) e 3 (b).....	75
Gráfico 14 –	Volume armazenado no reservatório Jucazinho nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).....	76
Gráfico 15 –	Volume armazenado no reservatório Prata nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).....	78
Gráfico 16 –	Variação dos custos operacionais para a simulação de longo prazo nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).....	79
Gráfico 17 –	Tempo de processamento para simulação de longo prazo em função da quantidade de iterações e partículas.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Principais referências de acordo com a frequência de citações.....	15
Tabela 2 -	Principais referências de acordo com a centralidade.....	29
Tabela 3 –	Demanda de água para os horizontes de planejamento estabelecidos, população e quantidade de ligações ativas para cada centro de consumo..	40
Tabela 4 –	Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pelo sistema de Jucazinho.....	42
Tabela 5 –	Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pelo sistema do Prata.....	43
Tabela 6 –	Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pela Adutora do Pirangi.....	44
Tabela 7 –	Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pela Adutora de Serro Azul.....	45
Tabela 8 –	Percentuais iniciais de armazenamento dos reservatórios nos cenários analisados.....	49
Tabela 9 –	Variáveis de decisão para o processo de otimização de zoneamento operacional dos reservatórios.....	60
Tabela 10 –	Vazões médias por fonte hídrica nos horizontes de planejamento e cenários analisados.....	69
Tabela 11 –	Custos operacionais médios para a simulação de curto prazo nos cenários e horizontes de planejamento analisados ao longo dos meses.....	71
Tabela 12 –	Mínimo, máximo e desvio padrão dos custos operacionais registrados nos cenários e horizontes de planejamento analisados.....	79
Tabela 13 –	Variação de vazões alocadas por fonte e custos operacionais para a simulação de longo prazo nos cenários analisados.....	80

## LISTA DE SIGLAS

ACO	<i>Ant colony optimization</i>
AG	Algoritmo genético
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
AWOA	<i>Adaptative whale optimization algorithm</i>
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BIRD	Banco Mundial
BPSO	<i>Binary particle swarm optimization</i>
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DPSO	<i>Discrete particle swarm optimization</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEA	<i>Individual evolutionary algorithm</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MOPSO	<i>Multiple objective particle swarm optimization</i>
NSGA II	<i>Non-dominated sorting genetic algorithm II</i>
PISF	Projeto de Integração do São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional
PSH/PE	Projeto de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco
PSO	<i>Particle swarm optimization</i>
PTSF	Projeto de Transposição do Rio São Francisco
QPSO	<i>Quantum-behaved particle swarm optimization</i>
SDEC/PE	Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Pernambuco
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SSD	Sistema de suporte à decisão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_t$	Área da superfície da água do reservatório no início do intervalo de tempo $t$
$c_1$	Fator cognitivo
$c_2$	fator social
$c_F$	Custo unitário fixo da Adutora do Agreste
$C_{i,j}$	Coefficiente de rugosidade do trecho $i - j$
CO	Custo operacional total para operação do sistema
$c_V$	Custo unitário da Adutora do Agreste
$d_i$	Demanda do centro de consumo $i$
$D_{i,j}$	Diâmetro do trecho $i - j$
$e_{i,j}$	Custo de energia do trecho $i - j$
$E_t$	Lâmina de evaporação no intervalo de tempo $t$
$f_{i,c}$	Fatores de redução a depender dos cenários de acumulação
FO	Função objetivo a ser minimizada
$G_{best}$	Melhor posição no espaço de busca percorrido por alguma das partículas
$H_{man\ i,j}$	Altura manométrica do trecho $i - j$
$H_{man\ i,j,t}$	Altura manométrica do trecho $i - j$ no tempo $t$
$I_t$	Entrada no reservatório no intervalo de tempo $t$
$L_{i,j}$	Comprimento do trecho $i - j$
$n$	Quantidade de partículas
$N$	Número de horas de operação diária
NC	Número total de centros de consumo
$ND_{i,1}$	Número de dias que o reservatório pode operar em colapso
$ND_{i,2}$	Número de dias que o reservatório pode operar em regime pré-colapso
NF	Número total de fontes hídricas
$P_{best}$	Melhor posição individual da partícula
Pen	Função de penalização
$P_t$	Precipitação na superfície da água no intervalo de tempo $t$
$P_{j,max}$	Máximo percentual de aproveitamento da fonte $j$
$P_{Vmin}$	Porcentagem do volume mínimo do reservatório
$P_t$	Precipitação na superfície da água no intervalo de tempo $t$

$q_{c_{i,j,t}}$	Vazão corrigida alocada da fonte j para o centro de consumo i no tempo t
$q_{i,j}$	Vazão captada da fonte j para o centro de consumo i
$q_i^*$	Vazão da Adutora do Agreste para o centro de consumo i
$Q_{j,min}$	Vazão da fonte j no dia mais crítico do mês analisado
$Q_{j,t}$	Disponibilidade hídrica da fonte j no tempo t
$Q_t^i$	Vazão captável no tempo t
$Q_{trans}$	Capacidade de transporte
$S_{f_{i,j,t}}$	Perda de carga unitária do trecho i – j no tempo t
$V_{demanda}$	Volume retirado de água definido pelo SSD
$v_i^I$	Limite inferior factível da velocidade da partícula i
$v_i^S$	Limite inferior factível da velocidade da partícula i
$V_i^t$	volume de armazenamento no reservatório no tempo t
$v_{i(t)}$	Velocidade da partícula i na iteração t
$V_t$	Volume no início do intervalo de tempo t
$V_{Vt}$	Transbordamento do vertedouro no intervalo de tempo t
$V_{k \max}$	Máximo volume para a operação da curva-guia k
$V_{k \min}$	Mínimo volume para a operação da curva-guia k
$x_i^I$	Limite inferior factível da posição da partícula i
$x_i^S$	Limite superior factível da posição da partícula i
$x_{i(t)}$	Posição da partícula i na iteração t
$X_{i,j}$	Valores percentuais da fonte j para o centro de consumo i relativos ao $Q_{j,t}$
$\beta$	Fator de penalização
$\Delta$	Razão mínima entre os volumes máximo e mínimo das curvas-guia k
$\Delta Z_{i,j}$	Elevação para bombeamento do trecho i – j
$\eta$	Eficiência do conjunto motor-bomba
$\Upsilon$	Peso específico da água
$\omega$	Fator de inércia
$\omega_{fm}$	Valor final do fator de inércia
$\omega_{ini}$	Valor inicial do fator de inércia

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS E ESTRUTURA.....</b>	<b>17</b>
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2.3	ESTRUTURA.....	17
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
3.1	ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO.....	18
3.2	<i>PARTICLE SWARM OPTIMIZATION</i> (PSO).....	20
3.3	SSD APLICADO A SISTEMAS COM MÚLTIPLAS FONTES HÍDRICAS.....	26
<b>3.3.1</b>	<b>Método de otimização.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Escassez hídrica e transferência de água entre bacias.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Modelo de alocações de vazões.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>36</b>
4.1	MUNICÍPIOS ANALISADOS.....	39
4.2	RESERVATÓRIO JUCAZINHO.....	41
4.3	RESERVATÓRIO PRATA.....	42
4.4	ADUTORA DO PIRANGI.....	44
4.5	ADUTORA DE SERRO AZUL.....	45
4.6	ADUTORA DO AGRESTE.....	46
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
5.1	SIMULAÇÃO DE CURTO PRAZO.....	49
<b>5.1.1</b>	<b>Variáveis de decisão.....</b>	<b>51</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Restrições.....</b>	<b>51</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Função objetivo.....</b>	<b>52</b>
5.2	SIMULAÇÃO DE LONGO PRAZO.....	53
<b>5.2.1</b>	<b>Variáveis de decisão.....</b>	<b>55</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Restrições.....</b>	<b>55</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Função objetivo.....</b>	<b>56</b>
5.3	ZONEAMENTO OPERACIONAL DOS RESERVATÓRIOS.....	57
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>60</b>

6.1	SIMULAÇÃO DE CURTO PRAZO.....	63
6.2	SIMULAÇÃO DE LONGO PRAZO.....	72
7	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em meio a cenários de escassez hídrica provenientes de períodos de seca, precipitação reduzida e poluição de mananciais, garantir a confiabilidade do abastecimento da população é fator-chave para evitar conflitos e vulnerabilidades. Apesar de haver uma predisposição natural para regiões com má distribuição de recursos hídricos e condições climáticas adversas, as ações antropogênicas tornam o cenário ainda mais preocupante. Problemas como, por exemplo, alta demanda de água associada ao crescimento populacional, poluição de corpos d'água e mudanças climáticas ampliam significativamente o déficit hídrico, trazendo condições insustentáveis para a população e o ambiente local (NABINEJAD; MOUSAVI; KIM, 2017).

Ren *et al.* (2020) destacam que as mudanças climáticas e a intensificação das atividades humanas mudaram a estacionariedade das séries hidrometeorológicas, trazendo maior incerteza na utilização dos recursos hídricos. Um desafio chave do gerenciamento de recursos hídricos é reduzir a vulnerabilidade desse sistema, mesmo que as influências antropogênicas não possam ser previstas por métodos estatísticos. A modelagem de sistemas de abastecimentos de água é complexa, repleta de incertezas e dados de entrada incompletos, o que muitas vezes impede a garantia da confiabilidade da alocação de vazões e a quantificação de riscos do abastecimento.

No âmbito de gerenciamento de recursos hídricos, um tema bastante relevante é a concepção e a operação de sistemas hidráulicos integrados (LI *et al.*, 2017; GAO; LIU; SUN, 2018; REN *et al.*, 2020). A integração de múltiplas fontes de água é uma alternativa eficaz para aliviar problemas de escassez hídrica e garantir o desenvolvimento de políticas efetivas de alocação de água. Apesar disso, sistemas de abastecimento com múltiplas fontes hídricas, especialmente água transferida, tornam a gestão dos recursos hídricos um grande desafio (GAO; LIU; SUN, 2018; LIU *et al.*, 2019). A presença de múltiplas fontes de água leva ao problema de multiprocessos, pois requer análises complexas das limitações infraestruturais do sistema, controle de volumes de reservatórios, projeções de demanda e previsões climáticas, exigindo assim um método de otimização robusto para a tomada de decisão.

A promoção de variadas metodologias de gerenciamento de recursos hídricos, sejam métodos de algoritmos genéticos, inteligência coletiva ou modelos de simulação de bacias, é crucial para auxílio da tomada de decisão. Yao e Geogakakos (2001) constatam que previsões de vazões confiáveis e sistemas de suporte à decisão (SSD) adaptáveis beneficiam substancialmente o desempenho dos reservatórios e, conseqüentemente, do sistema de abastecimento de água. Para isso, o SSD deve ser capaz de concentrar esforços no desenvolvimento de estratégias de aumento da oferta de água e controle consciente da demanda.

A eficácia do modelo de alocação de vazões está diretamente ligada à capacidade do método de otimização adaptar-se ao local de estudo e ser descrito por suas características. Percebe-se que algoritmos evolucionários e de inteligência coletiva, acoplados a modelos de simulação de reservatórios, têm sido uma escolha frequente para utilização na gestão de recursos hídricos e gerado resultados consistentes a boas taxas de convergência (CHANG; CHANG, 2009; WANG *et al.*, 2015; YAN *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2019; XU; CHEN, 2020). Rebouças (1997) destaca a necessidade de utilizar técnicas capazes de auxiliar no processo de análise, operação, planejamento e tomada de decisão em sistemas de recursos hídricos, de modo mais profundo que um simples balanço entre oferta e demanda.

O método de inteligência coletiva *particle swarm optimization* (PSO) assume uma posição de destaque entre os algoritmos probabilísticos, sendo frequentemente aplicado nas mais diversas áreas e destacando-se, em relação ao algoritmo genético, por melhores resultados a menores tempos de processamento (MORAES; NAGANO, 2012). O modelo foi inspirado na dinâmica e comportamento de populações socialmente organizadas na natureza, que são influenciadas pela experiência pessoal do indivíduo e pelo conhecimento do grupo. O PSO é um método eficiente, robusto e de implementação fácil com poucos parâmetros a serem ajustados (KAR *et al.*, 2012) e, por isso, tem ganhado espaço no campo científico na área de abastecimento de água com múltiplas fontes hídricas (QU; LOU, 2013; WANG *et al.*, 2015; NABINEJAD; MOUSAVI; KIM, 2017; YAN *et al.*, 2018).

No semiárido brasileiro, especialmente no Agreste pernambucano, há uma grande concentração de pessoas, poucas opções de mananciais locais, baixos índices pluviométricos e altas taxas de evaporação, gerando um cenário de conflitos que destaca a importância de um planejamento estratégico. Com o passar dos anos, fez-se necessário trazer água de distâncias cada vez maiores para garantir o abastecimento de água em quantidade e qualidade à população, recorrendo a transposições de pequeno, médio e grande porte. Desse modo, verifica-se que as transposições de água e sistemas integrados fazem parte da realidade do Agreste de Pernambuco (RAMOS, 2017).

Buscar tecnologias e estratégias para otimizar a gestão dos recursos hídricos é uma ferramenta indispensável para minimizar as ineficiências de provisão. Diante deste panorama, o presente estudo buscou desenvolver um Sistema de suporte à decisão para alocação de vazões de centros de consumo no Agreste pernambucano, através de simulações de curto e longo prazo em uma proposta integrada de otimização via *particle swarm optimization* acoplado ao modelo de zoneamento operacional de reservatórios.

## 2 OBJETIVOS E ESTRUTURA

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de suporte à decisão para a operação otimizada e integrada de múltiplas fontes hídricas, considerando critérios técnicos e econômicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as máximas vazões captáveis dos reservatórios Jucazinho e Prata, através de regras de zoneamento operacional de reservatórios por cenários de controle e curvas-guia.
- Avaliar a viabilidade de integração das múltiplas fontes hídricas no Agreste pernambucano, considerando os custos operacionais.
- Investigar a performance do método de inteligência coletiva *particle swarm optimization* na obtenção da solução ótima do problema proposto, avaliando a convergência do algoritmo e o tempo de processamento.

### 2.3 ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro deles mostra a introdução, a relevância e os objetivos do trabalho; o segundo traz a revisão teórica, com conceitos importantes sobre o processo de otimização e a aplicação do SSD a sistemas de abastecimento com múltiplas fontes hídricas. No terceiro capítulo, é feita a caracterização da área de estudo, detalhando os municípios analisados e as fontes hídricas envolvidas no processo de otimização. O quarto capítulo explica a metodologia com a descrição do processo de simulação de curto e longo prazos e do zoneamento operacional dos reservatórios. O quinto apresenta e discute os resultados da alocação de vazões e modelagem dos reservatórios, bem como informações relativas a custos e tempos de processamento computacional. No sexto capítulo, são feitas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros e, por fim, tem-se as referências bibliográficas utilizadas.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados e discutidos alguns conceitos importantes para a compreensão deste trabalho.

#### 3.1 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

A otimização é o processo de maximizar ou minimizar uma função objetivo desejada enquanto satisfaz as restrições prevaletentes. Na natureza, há uma abundância de exemplos em que se busca um status de sistema ideal e, semelhantemente, as organizações e empresas se empenham em alcançar tal posição. As soluções baseadas em julgamento e experiência deram espaço a utilização de técnicas de otimização avançadas, visto que o aumento da concorrência e das demandas dos consumidores exigem que as soluções sejam ótimas e não apenas viáveis (BELEGUNDU; CHANDRUPATLA, 2011).

Nos últimos anos, as técnicas de otimização avançaram rapidamente e um progresso importante foi alcançado. Ao mesmo tempo, os computadores digitais tornaram-se mais rápidos, versáteis e eficientes, permitindo resolver problemas de otimização complexos que antes eram considerados intratáveis. Apesar disso, é necessário um esforço considerável para aplicar técnicas de otimização em problemas reais, sendo invariavelmente requerido do sistema o ajuste de parâmetros algorítmicos, escalonamento e até mesmo a modificação de técnicas de otimização (GOLDBERG, 1989; ANTONIOU; LU, 2007).

A maioria dos problemas da vida real tem várias soluções e, ocasionalmente, um número infinito de soluções pode ser possível. Supondo que o problema em questão admite mais de uma solução, a otimização pode ser alcançada encontrando a melhor solução para o problema em termos de algum critério de desempenho. Se o problema admitir apenas uma solução, ou seja, apenas um conjunto único de valores de parâmetros é aceitável, a otimização não pode ser aplicada (BELEGUNDU; CHANDRUPATLA, 2011). Os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser, basicamente, de dois tipos: determinísticos ou probabilísticos. Até o momento, ambos têm sido mais usados como uma ferramenta de auxílio à decisão do que para geração de um projeto detalhado.

Na literatura, alguns termos relativos à otimização são frequentemente utilizados. A seguir, seguem alguns conceitos e definições essenciais para compreensão deste trabalho (SHEHATA; LEITE, 1999).

- Variáveis de projeto → Parâmetros que se alteram durante o processo de otimização. Estas podem ser classificadas em dois tipos: variáveis de estado e variáveis de decisão.
- Função objetivo → Função a qual se pretende minimizar ou maximizar, dependente de uma ou mais variáveis de decisão.
- Restrições de projeto → Funções de igualdade e desigualdade que descrevem e caracterizam as situações limítrofes de projeto, descrevendo matematicamente as situações consideradas factíveis e não factíveis.
- Espaço de busca → Conjunto, espaço ou região que compreende as possíveis ou viáveis soluções do problema a ser otimizado, caracterizado pelas funções de restrição.
- Ponto ótimo → Conjunto de valores para as variáveis de decisão pertencente ao espaço de busca que otimiza a função objetivo.
- Valor ótimo → Valor da função-objetivo no ponto ótimo.
- Solução ótima → Par formado pelo ponto ótimo e o valor ótimo.
- Ótimo local → Conjunto de valores para as variáveis de decisão que otimiza a função objetivo em um subespaço do espaço de busca.
- Ótimo global → Conjunto de valores para as variáveis de decisão que gera o melhor valor ótimo dentre todos os ótimos locais.

Os algoritmos probabilísticos utilizam parâmetros estocásticos para direcionar o processo de otimização e dispensam o uso de derivadas de funções. O ponto de partida do problema é escolhido aleatoriamente de acordo com alguma distribuição de probabilidade, sendo utilizados experimentos randômicos para decidir ao longo do processo o que fazer e para onde ir. Recentemente, algoritmos dessa natureza têm ganhado espaço nas mais diversas áreas do conhecimento, mas a introdução da aleatoriedade, apesar de render bons resultados, pode trazer incerteza, tanto da qualidade da resposta obtida quanto do tempo de execução exigido (FIGUEIREDO *et al.*, 2007).

Em geral, os métodos de otimização baseados nos algoritmos probabilísticos costumam ser mais eficientes que os determinísticos, visto que a função objetivo e as restrições não precisam ter uma representação matemática e muito menos serem contínuas e diferenciáveis, trabalham adequadamente tanto com parâmetros discretos quanto contínuos e, na maior parte dos casos, costumam ser mais simples de implementar. Em contrapartida, a maior desvantagem é o tempo de processamento computacional necessário, que depende diretamente do custo computacional atrelado à avaliação da função objetivo e do nível de incerteza desejado.

Nesses métodos, frequentemente a natureza é utilizada como fonte de inspiração para solução de problemas complexos, seja através da computação evolucionária, inteligência coletiva, redes neurais artificiais, sistemas imunológicos artificiais ou sistemas endócrinos artificiais. Conhecidos como algoritmos bioinspirados, esses algoritmos têm como princípio fundamental obter uma população inicial com soluções factíveis que permita o intercâmbio de informações sob regras específicas para obtenção de uma solução ótima, que não seria possível obter via abordagens tradicionais com programação matemática (SERAPIÃO, 2009).

Em especial, os algoritmos de inteligência coletiva têm atraído grande interesse nas últimas duas décadas por sua flexibilidade e versatilidade, sendo muito eficientes na resolução de problemas não lineares com aplicação em situações reais (YANG; KARAMANOGLU, 2013). O termo “inteligência coletiva” foi proposto no fim da década de 1980 e se referia a sistemas robóticos compostos por uma coleção de agentes simples em um ambiente interagindo de acordo com regras locais. White e Pagurek (1998) definem inteligência coletiva como um sistema composto por agentes não inteligentes e com capacidade individual limitada capaz de apresentar comportamentos coletivos inteligentes.

Os algoritmos de inteligência coletiva baseiam-se no comportamento coletivo de sistemas auto-organizados, distribuídos, autônomos, flexíveis e dinâmicos, que possuem a capacidade de perceber e modificar o seu ambiente de maneira local, tornando possível a comunicação entre os agentes e levando ao surgimento de um comportamento global que se aproxima da solução do problema (SERAPIÃO, 2009). Os principais algoritmos dessa classe são: *ant colony optimization* (DORIGO; STÜTZLE, 2004), *particle swarm optimization* (KENNEDY; EBERHART, 1995) e *bee colony optimization* (KARABOGA; BASTURK, 2007).

### 3.2 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)

A otimização por enxame de partículas (*particle swarm optimization* – PSO) foi desenvolvida por Kennedy e Eberhart (1995) como um algoritmo de otimização estocástica baseado em modelos de simulação social. O modelo é inspirado na dinâmica e comportamento de populações socialmente organizadas na natureza, como bandos de pássaros, cardumes de peixes e rebanhos de animais. Em termos gerais, os indivíduos da população são representados por partículas que se deslocam em um espaço de busca e são influenciadas pela própria experiência, sistema cognitivo, e através do conhecimento das partículas vizinhas, sistema social.

O algoritmo emprega uma população de partículas que se move estocasticamente no espaço de busca. Ao mesmo tempo, a melhor posição já alcançada por cada partícula, também chamada de experiência, é retida na memória. Essa experiência é então comunicada a parte ou a toda a população, enviesando seu movimento em direção às regiões mais promissoras detectadas até o momento. O esquema de comunicação é determinado por uma rede social fixa ou adaptativa que desempenha um papel crucial nas propriedades de convergência do algoritmo (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010).

Kennedy, Eberhart e Shi (2001) afirmam que o processo de adaptação cultural se baseia na capacidade das partículas sentirem o ambiente e estimarem seu próprio comportamento, seguido da comparação de desempenhos entre o grupo e imitação de trajetórias promissoras. Segundo Millonas (1994), o PSO preserva propriedades comuns aos algoritmos de inteligência coletiva, reconhecidas como os cinco princípios básicos:

1. Proximidade → Capacidade de realizar cálculos de espaço e de tempo.
2. Qualidade → Capacidade de responder aos fatores de qualidade ambiental.
3. Resposta diversa → capacidade de produzir uma pluralidade de respostas diferentes.
4. Estabilidade → Capacidade de reter comportamentos robustos sob mudanças ambientais moderadas.
5. Adaptabilidade → Capacidade de mudar o comportamento quando ditado por fatores externos.

A natureza irrestrita do método de otimização por enxame de partículas exige a adoção de medidas para otimização de problemas reais que, em sua maioria, são regidos por condições de restrição e de contorno. A abordagem mais comum para lidar com essa classe de problemas em algoritmos probabilísticos é a utilização de penalidades, fazendo com que soluções que violem as restrições sejam descartadas imediatamente e desconsideradas nas soluções seguintes. Sendo assim, funções de penalização baseadas na quantidade de restrições violadas devem ser adicionadas à função objetivo para que a solução seja factível e aplicável na área de estudo.

A estrutura do PSO exige a inicialização das partículas, bem como suas velocidades e posições iniciais. Se a otimização é restrita, a ideia é detectar soluções viáveis, isto é, soluções que não violem as restrições do problema e, por isso, a inicialização do enxame deve estar no espaço de busca. A técnica mais usual é a inicialização uniforme aleatória, o que significa que cada partícula do enxame inicial e, conseqüentemente, as posições e velocidade iniciais são descritas pela amostragem de uma distribuição uniforme sobre o espaço de busca definido.

De forma que o conjunto inicial de partículas e velocidades é gerado de forma aleatória conforme as Equações 1 e 2, respectivamente.

$$x_i^I \leq x_i \leq x_i^S, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$v_i^I \leq v_i \leq v_i^S, \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

Tal que  $x_i^I$  e  $x_i^S$  contêm os limites inferior e superior das posições das partículas,  $v_i^I$  e  $v_i^S$ , das velocidades das partículas e  $n$  é quantidade de partículas.

O PSO utiliza dois princípios sociométricos importantes, o  $G_{best}$  e o  $P_{best}$ , que representam, respectivamente, a melhor posição no espaço de busca percorrido por alguma das partículas e a melhor posição individual da partícula. Ambos incidem sobre a função objetivo adotada, o que garante a otimalidade da solução do problema. O impacto exercido pelas métricas  $G_{best}$  e  $P_{best}$  depende de duas constantes: o fator social ( $c_2$ ) e o fator cognitivo ( $c_1$ ). Além disso, a capacidade de exploração do espaço de busca é controlada pelo fator de inércia ( $\omega$ ), que traz o equilíbrio entre a exploração global e local, resultando em uma quantidade menor de iterações para encontrar a solução ótima.

Assim, uma partícula irá se mover em uma determinada direção que é função de alguns parâmetros: a posição atual  $x_{i(t)}$ , a velocidade atual  $v_{i(t)}$ , a inércia, a melhor posição já ocupada  $P_{best}$ , e a melhor posição já encontrada pelo enxame  $G_{best}$ . A velocidade da partícula é ajustada segundo a Equação 3.

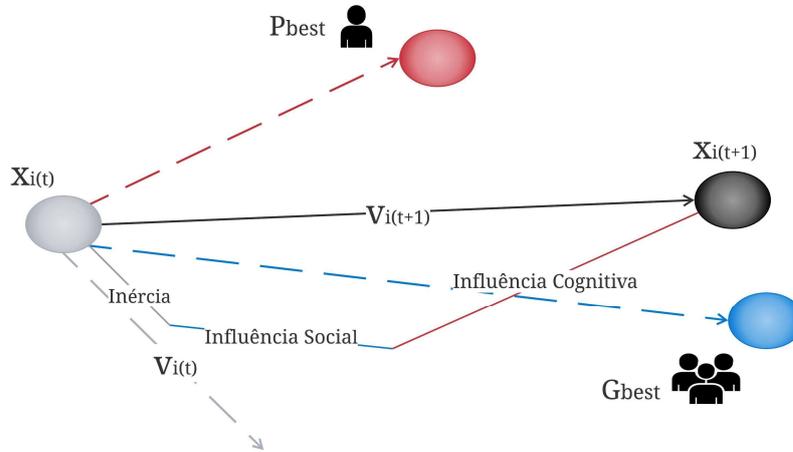
$$v_{i(t+1)} = \omega v_{i(t)} + \text{rand } c_1 (P_{best} - x_{i(t)}) + \text{rand } c_2 (G_{best} - x_{i(t)}) \quad (3)$$

Tal que  $c_1$  e  $c_2$  são constantes limitadas a um intervalo finito,  $i$  é a partícula analisada,  $t$  é iteração atual e  $\text{rand}$  gera valores aleatórios entre 0 e 1, que ajudam a partícula a não se perder em mínimos locais. Os fatores cognitivos e sociais,  $c_1$  e  $c_2$ , normalmente assumem o valor 2 (EBERHART; SHI, 2000).

Após o cálculo da velocidade da partícula, a posição da partícula  $i$  na próxima iteração é estabelecida como a adição da posição antiga e da velocidade calculada, sendo expressa pela Equação 4. Na Figura 1, é ilustrada a soma vetorial expressa na Equação 4, bem como as influências de cada uma das parcelas da Equação 3.

$$X_{i(t+1)} = X_{i(t)} + V_{i(t+1)} \quad (4)$$

Figura 1 - Influência das parcelas de inércia, cognitiva e social no processo de busca.



Fonte: Autora (2021).

O peso de inércia  $\omega$  tem efeito significativo no comportamento do algoritmo e indica a capacidade da partícula em manter sua atual trajetória, reduzindo as perturbações que afastam as partículas das melhores posições. Sem esta, mesmo que uma região promissora do espaço de busca fosse detectada, as partículas oscilariam em trajetórias largas em torno de suas melhores posições. A busca refinada em regiões promissoras, ou seja, em torno das melhores posições, requer forte atração das partículas em direção a estas e pequenas mudanças de posição que impeçam o escape de sua vizinhança próxima (PARSOPOULOS; VRAHATIS, 2010).

A exploração global tem sua atuação mais efetiva no início do processo, pois as partículas são espalhadas em um campo de busca bastante abrangente. Por isso, recomenda-se que  $\omega$  assumam valores maiores no início das buscas e, ao longo das iterações, seu valor seja reduzido gradativamente, garantindo assim uma convergência mais rápida. A sugestão, proposta por Eberhart e Shi (2000), foi utilizar uma variação linear da inércia com um valor inicial de 0,9 e final de 0,4, conforme Equação 5.

$$\omega_t = (\omega_{ini} - \omega_{fim}) \frac{(T-t)}{T} + \omega_{fim} \quad (5)$$

Tal que  $\omega_{ini}$  e  $\omega_{fim}$  são os valores inicial e final, respectivamente,  $T$  é o número total de iterações e  $t$  é a iteração atual. O funcionamento geral do algoritmo PSO é descrito através do pseudocódigo (Algoritmo 1):

---

**Algoritmo 1:** Pseudocódigo do algoritmo PSO
 

---

```

Para  $i \rightarrow 0$  até  $n$  faça:
  |
  |   Inicializa  $x_i$  e  $v_i$  aleatoriamente;
  |   Inicializa  $P_{besti}$ ;
Fim
Inicializa  $G_{best}$ ;
Enquanto não atingir a condição de parada faça:
  |
  |   Para  $i \rightarrow 0$  até  $n$  faça:
  |   |
  |   |   Calcula função objetivo da partícula  $i$ ;
  |   |   Atualiza  $v_i$  de acordo com a Equação 3;
  |   |   Atualiza  $x_i$  de acordo com a Equação 4;
  |   |    $P_{besti} \rightarrow$  melhor desempenho da partícula  $i$ ;
  |   |
  |   |   Fim
  |   |    $G_{best} \rightarrow$  melhor desempenho geral;
  |
  |   Fim
Retorna  $G_{best}$ ;
  
```

---

Comparado com as técnicas de computação evolucionária, como os Algoritmos Genéticos, o PSO é de implementação fácil, convergência rápida e existem poucos parâmetros para serem ajustados (KAR *et al.*, 2012), além de não possuir operadores de recombinação e mutação. Aliado a isso, o potencial do PSO para paralelização simples, bem como sua capacidade de adaptar facilmente seus componentes e operadores para assumir uma forma desejada implícita no problema em questão, colocaram o PSO em uma posição de destaque entre algoritmos de otimização inteligente, sendo frequentemente aplicado nas mais diversas áreas, como aprendizado de máquina, sistemas dinâmicos e pesquisa operacional.

Gaing (2004) utilizou o algoritmo de otimização PSO para determinação de parâmetros do controlador proporcional integral derivativo (PID) de um regulador de tensão automático (AVR). A abordagem proposta teve características superiores, incluindo fácil implementação, convergência estável, boa eficiência computacional e robustez, se comparado com o algoritmo genético (AG). Boeringer e Werner (2004) destacam que o otimizador de enxame de partículas compartilha a capacidade do algoritmo genético de lidar com funções de custo não lineares arbitrárias, mas com uma implementação muito mais simples, demonstrando claramente boas possibilidades para uso generalizado na otimização.

Mais tarde, Aljarah e Ludwig (2013) propuseram a utilização de um algoritmo de clusterização paralela baseado na otimização por enxame de partículas associada à metodologia MapReduce para detecção de intrusão em sistemas de dados e concluíram que a utilização do PSO evitou o problema de convergência prematura. Yu, Wei e Wang (2012) desenvolveram um PSO híbrido envolvendo a combinação com um AG para o modelo ideal de estimativa de

demanda de energia na China, o modelo alcançou maior precisão e confiabilidade do que os métodos simples de otimização como: AG, PSO, ACO. Semelhantemente, Moradi e Abedinie (2010) apresentaram um novo algoritmo genético combinado com otimização por enxame de partículas para localização ideal e dimensionamento de fontes de geração distribuída, o que melhorou a capacidade do método de encontrar soluções ótimas.

Além de versões híbridas do PSO, há na literatura diversas modificações do PSO padrão, visando atender a problemas de otimização discretos, binários, multiobjetivos, entre outros. Kennedy e Eberhart (1997) propuseram a reformulação do algoritmo PSO para operar com variáveis binárias discretas, conhecida como *Binary particle swarm optimization* (BPSO). Pedrasa, Spooner e Macgill (2009) utilizaram o algoritmo BPSO para programar um número significativo de cargas interruptíveis variadas ao longo de 16 horas, atingindo uma exigência do sistema de cortes horários totais, ao mesmo tempo em que satisfizeram as restrições operacionais das cargas interruptíveis disponíveis, minimizando o custo e a frequência de interrupções do sistema.

Pan, Tasgetiren e Liang (2008) desenvolveram um algoritmo de otimização de enxame de partículas discretas (DPSO) hibridizado com o algoritmo de descida de vizinhança variável (VND) para melhorar ainda mais a qualidade da solução. A principal contribuição deste estudo é a representação das partículas como permutações discretas de trabalho e um novo método de atualização de posição é desenvolvido com base no domínio discreto. A metodologia foi aplicada para resolução do problema de programação de diagrama de fluxo sem espera e os resultados mostraram que os algoritmos DPSO e DPSO-VND geraram resultados melhores do que os valores de referência encontrados na literatura.

Devido ao sucesso do PSO na otimização de objetivo único, nos últimos anos, várias tentativas têm sido feitas para estendê-lo ao domínio de problemas multiobjetivo. O principal desafio na otimização de enxame de partículas multiobjetivo (MOPSO) é selecionar os atratores globais e locais de forma que o enxame seja guiado em direção à frente ótima de Pareto e mantenha diversidade suficiente (MOSTAGHIM; BRANKE; SCHMECK, 2007). Baghaee *et al.* (2016) utilizaram o MOPSO para projetar um sistema híbrido de microrrede de geração eólica-solar com armazenamento de energia de hidrogênio, minimizando três funções objetivo: custo anualizado do sistema, perda de carga esperada e perda de energia esperada. Os resultados da simulação mostram a eficácia do algoritmo multiobjetivo proposto para resolver o problema de dimensionamento ideal em contraste com os métodos tradicionais de objetivo único.

### 3.3 SSD APLICADO A SISTEMAS COM MÚLTIPLAS FONTES HÍDRICAS

Sprague e Carlson (1982) definem SSD como uma classe de sistema de informação que se baseia no processamento de transações para apoio das atividades de tomada de decisão em uma organização. A história da implementação de tais sistemas começa em meados da década de 1960 e, em 1980, estes já eram utilizados para além do domínio inicial de *softwares* de negócios e gerenciamento (POWER, 2008). Conforme a tecnologia evoluiu, novos *softwares* destinados ao suporte à decisão foram desenvolvidos e estudados, permitindo a combinação de dados e modelos analíticos sofisticados com interface amigável sob o controle do usuário.

O SSD deve ser capaz de processar grandes quantidades de dados, simular diversas soluções, disponibilizar relatórios claros com informações importantes e oferecer suporte para os modelos de otimização. Na área de recursos hídricos, lidar com múltiplas fontes hídricas, escassez hídrica e demandas conflitantes requer um método de otimização multiprocessos que ofereça suporte à tomada de decisão, o que torna o SSD uma ferramenta indispensável para auxílio da gestão dos sistemas.

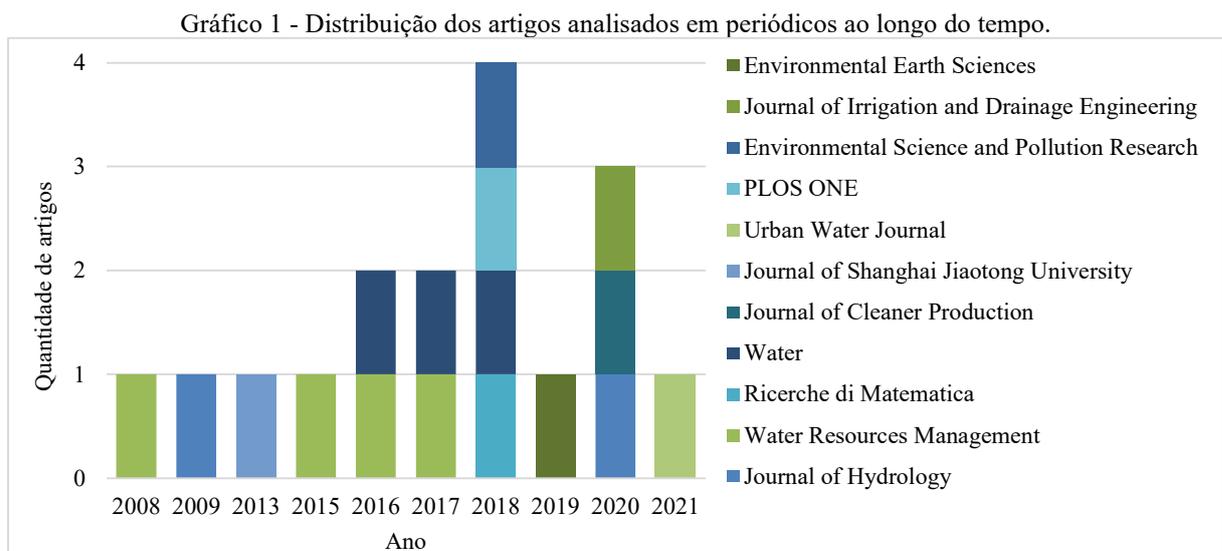
A fim de obter uma visão ampla sobre a utilização de SSD para alocação de vazões em sistemas de abastecimentos de água compostos por múltiplas fontes hídricas, foi realizada uma revisão sistemática da literatura especializada, buscando identificar as pesquisas mais relevantes. A seleção e o estudo dos trabalhos foram divididos em três etapas: coleta de trabalhos em plataformas de pesquisa, seleção dos trabalhos relevantes e detalhamento minucioso da premissa do artigo e utilização do CiteSpace. Dessa forma, foi possível obter uma análise ampla e aprofundada sobre a operação e a otimização de sistemas com múltiplas fontes hídricas, analisando e discutindo suas aplicações, suas limitações e o impacto da problemática na sociedade.

Na primeira etapa, as palavras-chave “*multiple water sources*” ou “*multiple water resources*” foram utilizadas na plataforma de pesquisa Scopus ([www.scopus.com/](http://www.scopus.com/)). A fim de restringir os parâmetros de pesquisa, foram utilizadas para refinamento da busca as palavras-chave “*water scarcity*”, “*interbasin water transfer*” ou “*allocation of water resources*” e selecionados apenas artigos de periódicos em inglês. Na etapa seguinte, avaliou-se a relevância de cada um dos trabalhos, respondendo às seguintes questões:

1. Qual o método de otimização utilizado para suporte à decisão?
2. A área de estudo apresenta problemas de escassez hídrica?
3. Foi necessário realizar transferência de água entre bacias?
4. O artigo detalha a alocação de vazões para municípios ou usos diferentes?

Assim, dos 77 artigos encontrados na plataforma de pesquisa Scopus, apenas 17 foram considerados relevantes para o campo de análise. Por fim, cada um dos 17 artigos foi descrito e classificado de acordo com o algoritmo de otimização utilizado, a escassez hídrica e as possíveis obras de transferência de água entre bacias da área de estudo e as características do modelo de alocação de vazões. E, através do *software* CiteSpace, foi possível identificar os principais autores e referências pela frequência de citações e o grau de centralidade dos trabalhos.

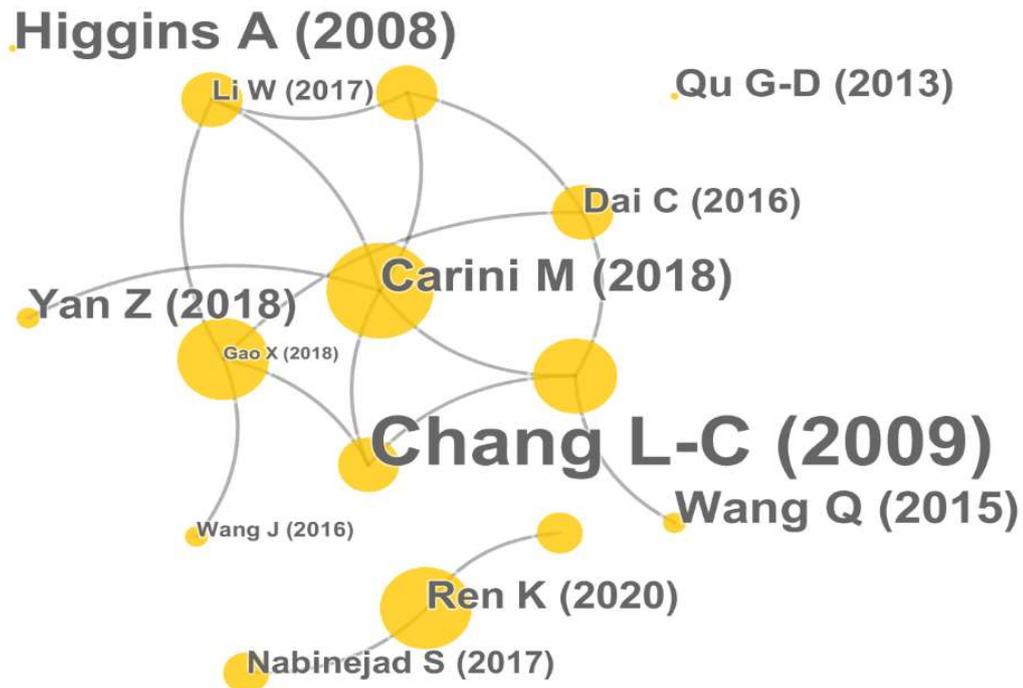
Analisando a distribuição de publicações sobre o tema em periódicos ao longo do tempo (Gráfico 1), percebe-se que, a partir de 2016, houve um aumento de trabalhos publicados, reforçando o caráter inovador da pesquisa e sua importância. O ano de 2018 foi o com maior quantidade de publicações, apesar disso o ano seguinte não acompanhou o padrão de crescimento. Os periódicos *Water* e *Water Resources Management* lideraram em número de publicações dentre os artigos analisados.



Fonte: Autora (2021).

Foram identificadas informações importantes sobre os artigos analisados como, por exemplo, as referências mais relevantes e o grau de centralidade (parâmetro fornecido pelo próprio *software*). A centralidade representa o grau de inovação do trabalho e sua atuação como fonte geradora de mais estudos na área, sendo representada pelos círculos amarelos, de forma que, quanto maior sua dimensão, maior o índice de centralidade da referência. Semelhantemente, a quantidade de citações do artigo é expressa pelo tamanho da fonte do trabalho, tal que maior destaque significa maior relevância do artigo. A rede das principais referências é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - Rede das principais referências fornecida pelo CiteSpace.



Fonte: Autora (2021).

Dada a frequência das citações, a Tabela 1 apresenta a classificação das principais referências. É perceptível a notoriedade do estudo realizado por Chang e Chang (2009), que otimizou a operação conjunta de reservatórios para aliviar a escassez hídrica e dar maior flexibilidade ao sistema de abastecimento de água, sendo precursor de muitos estudos na área. A utilização de um modelo de otimização evolucionária multiobjetivo foi um marco importante e estimulou o surgimento de mais trabalhos baseados em algoritmos inspirados em comportamentos da natureza.

Tabela 1 - Principais referências de acordo com a frequência de citações.

Frequência de citações	Centralidade	Referência	Periódico	Nomenclatura CiteSpace
109	0,07	Chang e Chang (2009)	Journal of Hydrology	Chang L-C (2009)
33	0,00	Higgins, Archer e Hajkowitz (2008)	Water Resources Management	Higgins A (2008)
16	0,00	Wang <i>et al.</i> (2015)	Water Resources Management	Wang Q (2015)
16	0,21	Carini <i>et al.</i> (2018)	Ricerche di Matematica	Carini M (2018)
15	0,00	Yan <i>et al.</i> (2018)	Water	Yan Z (2018)

Fonte: Autora (2021).

A centralidade de intermediação é normalizada para a unidade de intervalo [0,1] e mede o grau em que um trabalho é parte dos caminhos que conectam um par aleatório de trabalhos na rede, o que significa dizer que um trabalho de alta centralidade geralmente liga um ou mais grupos de trabalhos (CHEN, 2006). Avaliando os escores de centralidade das referências apresentados na Tabela 2, é reforçada a importância de Carini *et al.* (2018) na centralidade da pesquisa, apontando inovação ao propor um modelo de alocação de vazões inspirado no clássico problema de transporte da pesquisa operacional, reduzindo os custos do sistema e garantindo a distribuição de água de 39 fontes para 27 destinos.

Tabela 2 - Principais referências de acordo com a centralidade.

Frequência de citações	Centralidade	Referência	Periódico	Nomenclatura CiteSpace
16	0,21	Carini <i>et al.</i> (2018)	Ricerche di Matematica	Carini M (2018)
2	0,16	Gao, Liu e Sun (2018)	Environmental Science and Pollution Research	Gao X (2018)
0	0,16	Liu <i>et al.</i> (2019)	Environmental Earth Sciences	Liu (2019)
109	0,07	Chang e Chang (2009)	Journal of Hydrology	Chang L-C (2009)
9	0,07	Dai <i>et al.</i> (2016)	Water Resources Management	Dai C (2016)

Fonte: Autora (2021).

### 3.3.1 Método de otimização

Carini *et al.* (2018) afirmam que um método de otimização é “um conjunto de equações que definem e relacionam todos os componentes em um problema de decisão”. Para modelos de alocação de vazões, em que a complexidade do problema torna as soluções de otimização necessárias ou conduz a resultados inconsistentes com a realidade, utilizar uma metodologia robusta é fundamental. Dentre as várias opções, sejam modelos determinísticos ou probabilísticos, identificar o método de otimização que se ajuste melhor ao problema pode ser um desafio.

O detalhamento do método de otimização constitui-se como fator-chave para obtenção de melhores resultados, de forma que séries hidrometeorológicas, informações relativas a custos de operação do sistema, discriminação de fontes e demandas conflitantes, balanços hídricos de reservatórios e índices como resiliência, vulnerabilidade e confiabilidade são corriqueiramente utilizados no processo para garantir soluções aplicáveis (REN *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019). No Quadro 1, é mostrada a relação das metodologias utilizadas nos artigos analisados.

Quadro 1 - Métodos de otimização dos artigos analisados.

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Método de otimização</b>
Ahmad <i>et al.</i>	2018	BLMOLP
Cirilo <i>et al.</i>	2021	PSO
Carini <i>et al.</i>	2018	Otimização de menor custo baseada no problema de transporte
Chang e Chang	2009	NSGA-II
Dai <i>et al.</i>	2016	Programação restrita por chance de credibilidade difusa
Gao, Liu e Sun	2018	UWSRAM
Higgins, Archer e Hajkowicz	2008	Simulação Monte Carlo
Li <i>et al.</i>	2017	MMCDP
Liu <i>et al.</i>	2019	GA
Ma <i>et al.</i>	2020	MIFCP
Nabinejad, Mousavi e Kim	2017	PSO-MODSIM
Qu e Lou	2013	IEA-PSO
Ren <i>et al.</i>	2020	Abordagem baseada em cópula
Wang <i>et al.</i>	2016	WRMASSM baseado no CAS
Wang <i>et al.</i>	2015	QPSO
Xu e Chen	2020	NSGA-II melhorado
Yan <i>et al.</i>	2018	AWOA

Fonte: Autora (2021).

Algoritmos baseados na natureza estão ganhando atenção significativa devido à capacidade dessas abordagens de tratar problemas reais e descobrir soluções ótimas. Seja simulando processos de evolução biológica ou de inteligência coletiva de enxames, métodos inspirados no comportamento da natureza apresentam uma extensa gama de aplicações, inclusive na engenharia e no gerenciamento de recursos hídricos, e dispõem de princípios simples e de fácil implementação. Liu *et al.* (2019), por exemplo, propõem um modelo de otimização baseado em algoritmos genéticos para a operação de um sistema multirreservatório de transferência de água entre bacias, no qual a liberação e a transferência de água são consideradas variáveis de decisão que são otimizadas simultaneamente. Os resultados mostraram que a confiabilidade do sistema aumentou de 70,6% para 88,4% devido à transferência de água e a otimização pode aumentar ainda mais a confiabilidade para 96,4%, o que indica a eficácia do método de otimização.

Visando a otimização multiobjetivo do sistema multirreservatório em Taiwan, Chang e Chang (2009) optaram pela utilização do NSGA-II acoplado à simulação do balanço hídrico de reservatórios para otimizar operações conjuntas. Devido à abordagem multiobjetivo, o resultado da frente de pareto apresenta uma gama de possíveis soluções operacionais do sistema, auxiliando assim a tomada de decisão. Posteriormente, Xu e Chen (2020)

implementaram um modelo de agregação associado a uma abordagem melhorada do NSGA-II que acoplou à otimização uma análise de sensibilidade, melhorando assim a taxa de convergência do modelo. O sistema de transferência de água entre bacias otimizado pelos autores envolvia um grande número de reservatórios e ligações hidráulicas, o modelo de agregação permitiu simplificar a estrutura dos reservatórios e as estratégias de operação para diferentes tipos de abastecimento de água.

Além da computação evolucionária, métodos de inteligência coletiva tem ganhado espaço no campo científico devido à implementação mais simples, dada a ausência de mecanismos de permutação. Qu e Lou (2013) combinaram as características do algoritmo de enxame de partículas (PSO) e do algoritmo de evolução imunológica (IEA), a fim de reduzir a dependência da população inicial e a chance de o processo ficar preso em mínimos locais. Depois de aplicar este modelo à alocação de recursos hídricos em Zhoukou, China, foi possível obter uma taxa de garantia de abastecimento de 50% para os anos de análise, 2015 e 2025. Posteriormente, Wang *et al.* (2015) utilizaram o algoritmo de otimização para enxame de partículas comportadas quânticas (QPSO), incluindo nas variáveis de decisão curvas de regras operacionais para abastecimento e transferência de água e parâmetros de liberação do sistema em diferentes demandas de prioridade.

Nabinejad, Mousavi e Kim (2017) também utilizaram a otimização por enxame de partículas para propor um modelo de alocação de água em escala de bacia para reduzir a escassez hídrica em períodos de seca. A integração PSO-MODSIM permitiu derivar regras de operação dependentes do estado hidrológico, além de considerar critérios de sustentabilidade no processo para lidar melhor com os conflitos decorrentes de recursos hídricos limitados. Os resultados indicaram uma melhor distribuição da escassez de água em cerca de 7,5% usando regras operacionais condicionais que distinguem os estados hidrológicos secos, normais e úmidos.

Semelhantemente, Yan *et al.* (2018) optaram por utilizar o PSO, mas dessa vez para comparar aos resultados do algoritmo proposto (AWOA), que apresentou melhores taxas de convergência e precisão para a alocação de recursos hídricos da província de Hadan na China. No Brasil, Cirilo *et al.* (2021) adotaram o PSO para definir as vazões a serem transportadas das diferentes fontes para 18 localidades, minimizando os custos correspondentes. As variáveis de decisão foram os percentuais de descarga de cada fonte para cada centro de demanda e o modelo foi aplicado na região do Agreste do estado de Pernambuco, semiárido brasileiro. Os resultados mostraram que a operação otimizada dos reservatórios pode minimizar a transferência de água, sendo esse estudo precursor do presente trabalho.

Gao, Liu e Sun (2018), por sua vez, propuseram um modelo de avaliação de risco de escassez de água com base na incerteza para a gestão de recursos hídricos, visando revelar a distribuição da escassez hídrica por simulação estocástica de Monte Carlo baseada em cópula. A abordagem baseada em cópula também foi implementada por Ren *et al.* (2020) para simular a convergência entre diferentes fontes de água e a geração mensal de escoamento. Além disso, com base no projeto de Transferência de Água entre Bacias de Han para Wei, Província de Shaanxi da China, foram computadas informações importantes de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade do sistema. No estudo de Higgins, Archer e Hajkowicz (2008), a simulação de Monte Carlo permitiu avaliar o risco de falha no abastecimento de água na região Sudeste de Queensland, Austrália, que enfrenta problemas de escassez hídrica. Para isso, foram avaliados os impactos da introdução de políticas de restrição de demanda de água para usuários do sistema e os benefícios e riscos de novos projetos de infraestrutura como, por exemplo, usinas de reciclagem de água e dessalinização.

Li *et al.* (2017) aplicaram programação dinâmica restrita por acaso para alocação de recursos hídricos em Pequim, China, capaz de ajudar os tomadores de decisão a não apenas adquirir o máximo de benefícios, mas também evitar a ocorrência de risco no sistema. O modelo é capaz de gerar diferentes alternativas de alocação de recursos hídricos disponíveis sob diferentes probabilidades de violação. Wang *et al.* (2016) também estudaram os riscos do sistema de abastecimento de água, através da utilização do Índice de Segurança do Abastecimento de Água como parâmetro para minimizar a duração da escassez de água a longo prazo na cidade de Quanzhou, China. Os autores concluíram que um índice maior indica um nível mais alto de satisfação dos usuários de água, sendo afetado significativamente por reduções da precipitação, diminuições no coeficiente de produção de água e mudanças na superfície subjacente.

Na China, Dai *et al.* (2016) aplicaram um método de otimização inexato em grande escala aplicado ao gerenciamento do uso conjunto dos recursos hídricos na bacia do lago Dianchi. O objetivo do método de otimização foi a minimização do custo total do uso da água, incluindo o custo dos projetos de transferência de água, do armazenamento dos reservatórios, do bombeamento dos projetos de águas subterrâneas e da elevação dos projetos de captação de água. Mais tarde, Ma *et al.* (2020) desenvolveram uma programação restrita de credibilidade difusa de intervalo básico em múltiplas propriedades para alocação de água da província de Henan, também localizada na China. O modelo apresentou mais de 3900 parâmetros e 600 variáveis de decisão, de forma que as descobertas obtidas podem ser aplicadas para outras regiões.

Carini *et al.* (2018) desenvolveram uma metodologia inspirada no Problema de Transporte (Pesquisa Operacional), visando racionalizar a utilização dos volumes disponíveis dentro de um território, integrando disponibilidades, demandas e custos. A metodologia foi aplicada ao caso real da província de Crotone, sul da Itália, que em condições normais não sofre de problemas de escassez hídrica. A bacia do rio Swat no Paquistão, por sua vez, apresenta frequentemente conflitos entre vários setores de demanda de água devido à baixa disponibilidade hídrica, por isso, Ahmad *et al.* (2018) estudaram a alocação de recursos hídricos entre setores de demanda de água concorrentes, baseada em programação linear multiobjetivo simples de dois níveis.

### 3.3.2 Escassez hídrica e transferência de água entre bacias

Ma *et al.* (2020) apontam que distribuições espaciais e temporais desequilibradas de recursos hídricos agravam as contradições do desenvolvimento econômico local e da demanda por recursos hídricos. A falta de água gera conflitos de uso da água, vulnerabilidades e é um forte obstáculo para o desenvolvimento econômico em muitos países do mundo. Visando sanar esses problemas, podem fazer-se necessários projetos de transferência de água entre bacias, que compensam a falta de recursos hídricos, garantem o abastecimento das variadas demandas e reduzem os impactos socioeconômicos da escassez hídrica. Dentre os artigos analisados, pode-se perceber que em apenas um não há problema de escassez hídrica na área de estudo. Além disso, 90% dos artigos que apresentam projetos de transferência de água modelam sistemas de abastecimento de água da China.

A distribuição espacial e temporal da precipitação é desigual na China devido ao clima das monções e, por isso, muitos reservatórios e projetos de transferência foram construídos para regularizar vazões e garantir o atendimento das demandas (HU *et al.*, 2010). O projeto de transferência de água do Sul para o Norte, que desvia água do Rio Yangtzé para o Rio Amarelo e para o Rio Hai, é citado em diversos trabalhos (WANG *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2017; GAO; LIU; SUN, 2018; YAN *et al.*, 2018; MA *et al.*, 2020; REN *et al.*, 2020). Para a província chinesa de Hadan, cuja média de água é apenas um duodécimo da média nacional, Yan *et al.* (2018) destacam que a transferência de água do Sul para o Norte importou grandes quantidades de água, aliviando o problema de escassez hídrica e garantindo o abastecimento doméstico, industrial e ecológico.

Semelhantemente, o projeto de transferência de água do Sul para o Norte ajudou a aliviar o estresse hídrico da província de Shandong (GAO; LIU; SUN, 2018) e, desde 2014, fornece água para Pequim, prometendo alcançar 10 centenas de milhões de metros cúbicos anualmente

(LI *et al.*, 2017). Além desse projeto, pode-se destacar, dentre os artigos analisados, o projeto de transferência de água do Rio Shu ao Reservatório Rizhao, de comprimento total equivalente a 88 km e 10 m<sup>3</sup>/s de capacidade de transferência de água, que beneficiou a província de Shandong, também na China (LIU *et al.*, 2019). O projeto de transferência de água do Rio Dongjiang para cidade de Shenzhen, situada no sudeste da China, foi capaz de reservar água para condições excepcionais, como períodos de seca ou incidentes repentinos de elevadores da água, e atender à demanda de água dos usuários do sistema (XU; CHEN, 2020).

No cenário nacional, transferências de água entre bacias são uma alternativa recorrente para sanar problemas de escassez hídrica. Cirilo *et al.* (2021) aplicaram o modelo de otimização ao Agreste Pernambucano, que tem o pior balanço hídrico de todo o país e três sistemas de transferência de água entre bacias estão em construção. Nessa região, o Projeto de Integração do São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) permite escoar continuamente uma vazão de 26,4 m<sup>3</sup>/s, mas, diante do atraso das obras e da estiagem na região do Agreste Central, o Governo do Estado propôs para operação conjunta as Adutoras do Pirangi e de Serro Azul, localizados em uma das regiões mais chuvosas do estado.

Há casos, no entanto, em que a escassez hídrica não pode ser atenuada por transferências de água entre bacias, por quaisquer limitações infraestruturais ou hídricas. Por isso, cabe ao modelo de otimização adequar a alocação de água às fontes locais disponíveis, evitando o colapso do sistema. Nabinejad, Mousavi e Kim (2017) mostraram que há um déficit de cerca de 30% na bacia do Rio Atrak, no norte do Irã, e que o compartilhamento dos déficits hídricos entre vários setores é inevitável. Em Queensland na Austrália, Higgins, Archer e Hajkowicz, (2008) propuseram um modelo de operação conjunta de 3 reservatórios, introduzindo um cenário de utilização de água de reuso para abastecimento as centrais elétricas e a indústria, o que reduziu significativamente o risco de colapso dos reservatórios.

### **3.3.3 Modelo de alocações de vazões**

O estudo sobre a alocação ótima de recursos hídricos tem chamado atenção há anos em todo o mundo, sejam modelos para uma única fonte ou várias, com um único objetivo para otimização ou múltiplos, orientados pela oferta ou demanda, é notória a necessidade de tornar o abastecimento de água mais eficiente, em cenários de escassez hídrica ou não (WANG *et al.*, 2016; YAN *et al.*, 2018). Para isso, é de extrema importância que o modelo de alocação adegue-se bem a área de estudo, desde características físicas e climáticas até possíveis

oscilações de demandas e conflitos pelo uso da água precisam ser analisados por um método de otimização robusto, que ofereça suporte para a complexa tomada de decisão.

Muitos artigos limitam a alocação ótima de recursos hídricos a quatro setores de uso de água concorrentes: agrícola, doméstico, industrial e ecológico (QU; LOU, 2013; AHMAD *et al.*, 2018; GAO; LIU; SUN, 2018; MA *et al.*, 2020). Yan *et al.* (2018) estudaram a alocação de vazões para Hadan na China, considerando as 16 divisões administrativas da província e discriminando as demandas em urbana doméstica; rural doméstica; setores primário, secundário e terciário; e ecológica. Para garantir o abastecimento, foi considerado um sistema de múltiplas fontes com dois reservatórios; projetos de transferência de água do Sul para o Norte, e do Rio Amarelo; água de reuso; e fontes subterrâneas e superficiais locais.

Carini *et al.* (2018) levantaram informações sobre as 29 nascentes, três derivações e sete poços da província de Crotone, no sul da Itália, obtendo uma disponibilidade de água potável equivalente a 1534,8 L/s para uma demanda de água de 922,2 L/s. O problema foi caracterizado com 39 fontes e 27 pontos de consumo. Cirilo *et al.* (2021), por sua vez, adotaram um modelo de alocação de vazões para 5 fontes hídricas que abastecem 18 centros de consumo, analisando séries históricas de 44 anos. Wang *et al.* (2016) constataram, para a cidade Quanzhou na China, que o abastecimento médio de água em 2015 foi de 3,433 bilhões de m<sup>3</sup>, mas a demanda média de água foi de 3,486 bilhões de m<sup>3</sup>, o que reforça a necessidade de um modelo de alocação de vazões para a cidade. Os pesquisadores também optaram por separar Quanzhou em distritos e avaliar as demandas doméstica, industriais primária, secundária e terciária, e ecológica.

Dai *et al.* (2016) avaliaram quatro distritos administrativos chineses contemplados por oito reservatórios, projeto de transferência de água entre bacias e águas subterrâneas, cujas vazões são utilizadas para abastecimento doméstico, industrial e agrícola. Para Li *et al.* (2017), que estudaram o abastecimento de água de Pequim, China, as fontes foram águas subterrâneas, superficiais e transferidas, de forma que optou-se que os reservatórios Miyun e Guanting atuariam como fonte extra de água, respeitando probabilidades de violação.

## 4 ÁREA DE ESTUDO

A região semiárida brasileira é usualmente afetada por problemas de escassez hídrica, ocasionando diversos impactos socioeconômicos e ambientais que impõem obstáculos para o desenvolvimento da região. Na perspectiva de reduzir a vulnerabilidade da população atingida pela indisponibilidade de água, promover o uso racional da água e contornar os efeitos das estiagens, diversos debates e políticas públicas têm surgido ao longo do tempo. Campos (2014) destaca que a questão das políticas públicas de combate e convivência com as secas passou por grandes e acentuadas transformações ao longo dos dois últimos séculos, mas que ainda há muitos desafios na gestão das águas.

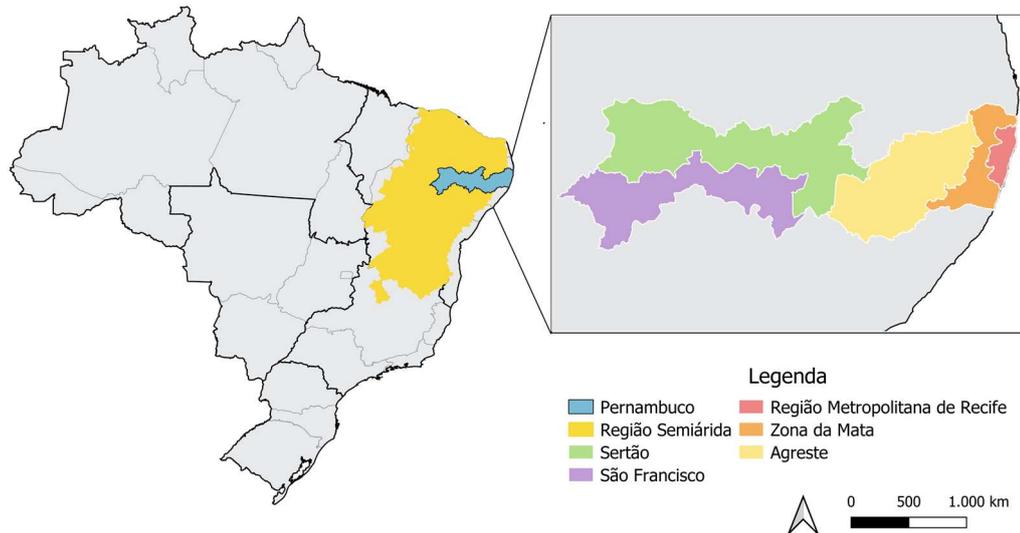
A escassez hídrica depende de sistemas meteorológicos que atuam na região e fenômenos climáticos de grande escala que influenciam as variáveis que definem o comportamento e circulação da atmosfera (MACEDO *et al.*, 2010). O semiárido nordestino apresenta grande variabilidade espacial e temporal das chuvas, com precipitações irregulares concentradas em poucos meses. Esse cenário associado ao alto potencial para evaporação da água, às características geológicas dominantes e às mudanças climáticas, que têm intensificado cada vez mais a problemática da escassez hídrica, colocam a região em constante alerta e necessidade de convivência com a seca (CIRILO, 2008; ASSIS; SOUZA; SOBRAL, 2015).

O estado de Pernambuco apresenta o balanço hídrico mais desfavorável do país e o Agreste pernambucano registra o pior desempenho de todo o estado (CIRILO, 2008). O Agreste de Pernambuco é pobre em volume de escoamento de água dos rios, o que impossibilita o pleno abastecimento da população e causa uma série de conflitos pelo uso da água. Além da baixa pluviosidade, há uma alta densidade demográfica na região, ausência de fontes locais que permitam o atendimento das demandas, altas taxas de evaporação e má qualidade da água, seja pela salinidade do solo ou pela carga de esgotos. Essa região vem sofrendo mais com os efeitos da escassez de água após a seca de 2012. Embora as chuvas em 2018 e 2019 tenham se aproximado da média de longo prazo, não foram suficientes para recuperar o armazenamento dos maiores reservatórios. A condição de seca mudou nos primeiros meses de 2020 com fortes chuvas na maior parte da região, todavia o histórico de episódios de seca destaca a distribuição espacial e temporal desigual da precipitação na região.

Cirilo *et al.* (2017) destacam que, apesar dos esforços para fornecer água suficiente, globalmente essas medidas não bastam para resolver os problemas decorrentes da escassez de água, principalmente no meio rural. Para tanto, tecnologias e alternativas de otimização da gestão dos recursos hídricos devem ser buscadas para minimizar os problemas de restrição da

disponibilidade hídrica e, por vezes, surge a necessidade de transferência de água entre bacias. No Agreste pernambucano, transferências entre bacias e sistemas integrados fazem parte da realidade. A localização da área de estudo no estado de Pernambuco é mostrada no Mapa 1.

Mapa 1 - Localização da região Agreste do estado de Pernambuco, área de estudo do trabalho.



Fonte: Autora (2021).

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) visa o atendimento, principalmente, das cidades de elevado déficit hídrico no semiárido, fora da bacia. A outorga preventiva do PISF, conferida pela Resolução ANA nº 411, de 22 de setembro 2005, estabeleceu a vazão firme de 26,4 m<sup>3</sup>/s disponível para bombeamento em qualquer situação hidrológica. Sendo assim, estabeleceu-se que o eixo Norte funcionará com uma vazão contínua de 16,4 m<sup>3</sup>/s e o eixo Leste com uma vazão de 10 m<sup>3</sup>/s. Quando o reservatório de Sobradinho estiver acima de 94% do seu volume útil, será permitida a captação da vazão máxima diária de 114,3 m<sup>3</sup>/s e instantânea de 127 m<sup>3</sup> /s (BRASIL, 2005).

No Estado de Pernambuco, os eixos Norte e Leste, ao atravessarem o seu território, servirão de fonte hídrica para sistemas adutores existentes ou em projeto, responsáveis pelo abastecimento de populações do Sertão e do Agreste. A Adutora do Agreste terá extensão superior a mil quilômetros e deverá abastecer 68 municípios e 80 localidades da região agreste de Pernambuco (COMPESA, 2020b). O Eixo Leste está em operação desde 2017 e a conclusão do Eixo Norte está projetada para 2021. A partir de informações dos órgãos executores, há a expectativa de que as obras do Ramal do Agreste e da Adutora do Agreste sejam concluídas até o final de 2021.

Com período de estiagem de 2012 e o atraso das obras do PISF, o Governo de Pernambuco cogitou a possibilidade de duas novas transferências de água para a região do Agreste Central, ambas da bacia do rio Una. Dentre estas, estão os projetos das Adutoras de Pirangi e de Serro Azul, localizados em uma das regiões mais chuvosas do estado. O sistema de abastecimento de água de 18 municípios do Agreste de Pernambuco foi analisado nesta pesquisa. Esses sistemas receberão um incremento de volume de projetos de transferência de água entre bacias e estão localizados nas bacias dos rios Ipojuca, Capibaribe e Una.

As seguintes fontes hídricas foram consideradas para o Sistema de suporte à decisão:

- Reservatórios Jucazinho e Prata e adutoras construídos na década de 1990;
- Adutora do Pirangi com desvio direto do rio Pirangi, finalizado em 2017;
- Adutora de Serro Azul, que capta água do reservatório de Serro Azul, com conclusão prevista para 2021;
- Adutora do Agreste, que receberá água do PISF e tem conclusão prevista para 2021.

Para quantificar a vazão captável em ambos os reservatórios, foram utilizadas as séries temporais de vazão da região de Toritama para o Jucazinho e de Belém de Maria para o Prata, cobrindo o período de março de 1973 a fevereiro de 2017. Supondo que as características físicas e climáticas da bacia hidrográfica sejam semelhantes até a barragem (CIRILO *et al.*, 2020), a vazão diária foi calculada proporcionalmente à área de drenagem entre o medidor de vazão e cada barragem. A taxa de evaporação foi obtida na estação meteorológica de Surubim para Jucazinho e de Garanhuns para o Prata, de forma que os doze valores do padrão climatológico normal foram repetidos para todos os anos da simulação. A série histórica das vazões pertence ao banco de dados hidrológicos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2021). As taxas de evaporação foram representadas com dados de estações climatológicas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021). A precipitação sobre os reservatórios e as curvas cota-área-volume foram disponibilizadas pela Agência Pernambucana de Clima e Águas (APAC, 2021).

O conjunto de vazões captáveis foi obtido através do conceito de zoneamento geral da capacidade do reservatório para as regras de operação baseadas no status de armazenamento no início de cada período de tempo (CHANG; CHANG, 2009). Foram definidos cenários de operação a partir de faixas percentuais de armazenamento dos reservatórios, sendo estes: colapso, pré-colapso, seca extrema, seca severa, seca, alerta, com restrição e normal. As faixas percentuais baseiam-se nas curvas-guia de zoneamento do reservatório, considerando o ano hidrológico para a análise. Para cada curva-guia, há dois patamares de restrição, separados por

um período de transição, a duração deles depende do nível de acumulação de água no reservatório, de forma que quanto mais crítico, maior o tempo com restrição mais severa.

#### 4.1 MUNICÍPIOS ANALISADOS

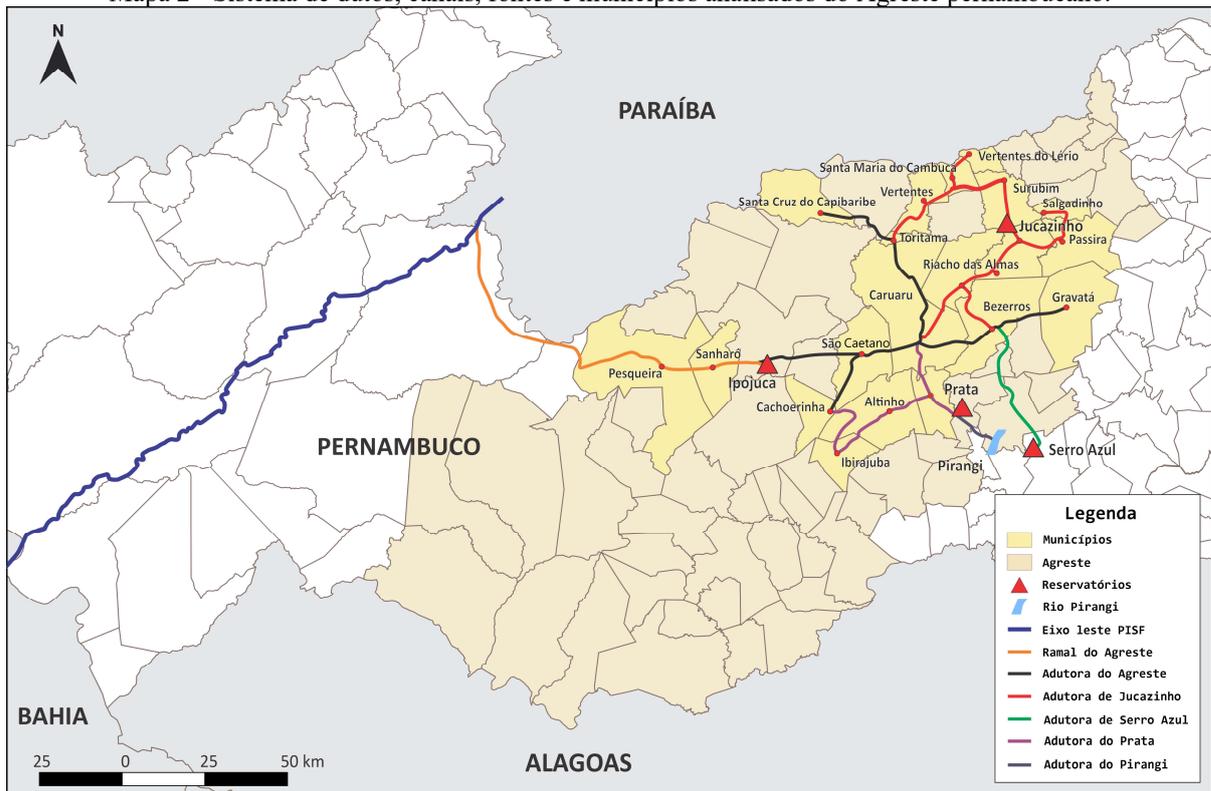
O Agreste de Pernambuco tem área de aproximadamente 24.400 km<sup>2</sup>, correspondendo a 25% do território de Pernambuco. A mesorregião é formada por 71 municípios e é dividida em seis Microrregiões: Alto Capibaribe, Brejo, Garanhuns, Médio Capibaribe, Vale do Ipanema e Vale do Ipojuca. Convém salientar ainda que essa mesorregião reúne três regiões de desenvolvimento: Agreste Setentrional, Agreste Central e Agreste Meridional, sendo estas compostas por 26, 26 e 19 municípios, respectivamente (MENDONÇA, 2016).

A economia caracteriza-se pela exploração agrícola, pecuária e atividades de comércio e serviços associadas aos centros urbanos dinâmicos, destacando-se como uma das regiões de maior potencial no comércio e geração de empregos no setor têxtil em Pernambuco. Quanto ao clima, a mesorregião do Agreste pernambucano apresenta cinco meses com concentração de precipitação pluvial por ano, sendo máxima nos meses de março e abril, decorrente do deslocamento para o sul da Zona de Convergência Intertropical (MENDONÇA, 2016).

Neste trabalho, o sistema de suporte à decisão foi aplicado para alocação de vazões para os seguintes centros de consumo: Agrestina, Altinho, Bezerros, Cachoeirinha, Caruaru, Cumaru, Gravatá, Ibirajuba, Passira, Riacho das Almas, Salgadinho, Santa Cruz do Capibaribe, Santa Maria do Cambucá, Surubim, Toritama, Vertente do Lério, Vertentes e o distrito de Ameixas. Destes, nove pertencem ao Agreste Setentrional e oito, ao Agreste Central. No Mapa 2, são mostrados os municípios descritos e a infraestrutura disponível para o abastecimento de água da região.

As demandas hídricas dos dezoito centros de demanda são apresentadas na Tabela 3 para duas dimensões de planejamento: consumo atual (estimado em 2014) e projeção para 2037, tendo-se como base os dados utilizados no projeto da transposição do rio São Francisco. Os horizontes de planejamento foram utilizados ao longo dos processos de otimização, a fim de investigar a interferência das demandas na alocação de vazões das fontes. Ambas as estimativas foram realizadas pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA, 2020a), responsável pela operação dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário na maioria dos municípios do estado de Pernambuco. Além disso, são mostradas na Tabela 3 as respectivas populações estimadas pelo IBGE para 2020 (IBGE, 2021) e a quantidade de ligações ativas em 2018, disponível no Diagnóstico de Água e Esgotos de Água e Esgoto (SNIS, 2020).

Mapa 2 - Sistema de dutos, canais, fontes e municípios analisados do Agreste pernambucano.



Fonte: Autora (2021).

Nota: Adaptado de Cirilo *et al.* (2021).

Tabela 3 - Demanda de água para os horizontes de planejamento estabelecidos, população e quantidade de ligações ativas para cada centro de consumo.

Município	População	Quantidade de ligações ativas	Demanda 2014 (L/s)	Demanda 2037 (L/s)
Agrestina	25.065	7.956	61,53	79,99
Altinho	22.984	6.646	49,78	64,71
Ameixas	-	-	35,00	45,50
Bezerros	60.880	18.134	144,89	188,36
Cachoeirinha	20.501	6.057	53,31	69,30
Caruaru	365.278	107.459	986,00	1281,80
Cumaru	10.192	2.243	24,60	31,98
Gravatá	84.699	29.679	278,00	361,41
Ibirajuba	7.768	1.686	12,25	15,93
Passira	28.894	5.401	51,88	67,44
Riacho das Almas	20.646	4.070	28,20	36,65
Salgadinho	11.068	976	12,04	15,65
Santa Cruz do Capibaribe	109.897	21.378	231,08	300,41
Santa Maria do Cambucá	14.223	2.249	50,98	66,28
Surubim	65.647	19.323	176,52	229,48
Toritama	46.164	10.389	122,10	158,73
Vertente do Lério	7.571	946	7,82	10,17
Vertentes	20.954	4.502	41,27	53,65

Fonte: Autora (2021).

Nota: Elaborada com informações de COMPESA (2020a), IBGE (2021) e SNIS (2020).

## 4.2 RESERVATÓRIO JUCAZINHO

O Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) foi o responsável pela construção de Jucazinho em 1998. Com capacidade máxima de 327 hm<sup>3</sup> e um volume para amortecimento de enchentes de 100 hm<sup>3</sup>, o reservatório pode reduzir sensivelmente o risco de inundações das cidades de Salgadinho e Limoeiro, além de conferir um aumento do fator de segurança relativo à proteção da cidade de Recife contra enchentes de grande magnitude (PERNAMBUCO, 2010). No Quadro 2, são mostradas informações importantes sobre o reservatório Jucazinho.

Quadro 2 - Características do reservatório Jucazinho.

<b>Capacidade máxima</b>	327 hm <sup>3</sup> *
<b>Cota de coroamento</b>	299 m
<b>Cota da soleira do vertedouro</b>	292 m
<b>Extensão do vertedouro</b>	170 m
<b>Usos pretendidos</b>	Controle de cheias, piscicultura, abastecimento público e recreação
<b>Corpo d'água</b>	Rio Capibaribe
<b>Município</b>	Cumaru e Surubim

\* Estudos de geoprocessamento feitos no Campus Agreste da UFPE revelam que a capacidade real de Jucazinho é cerca de 204 milhões de m<sup>3</sup>, valor utilizado nesta pesquisa.

Fonte: Autora (2021).

Nota: Elaborado com informações de APAC (2021) e Pernambuco (2010).

O sistema adutor de Jucazinho tem duas linhas adutoras principais, a Norte e a Sul, que juntas totalizam 270,9 km de extensão, de Surubim à Gravatá. A capacidade de adução é da ordem de 1.810 L/s e abrange os municípios de Surubim, Salgadinho, Passira, Cumaru, Vertente do Lério, Santa Maria da Cumbuca, Frei Miguelinho, Vertentes, Caruaru, Riacho das Almas, Gravatá e mais 45 distritos com população total de cerca de 800 mil habitantes nas bacias dos rios Capibaribe e Ipojuca. No Agreste pernambucano, Jucazinho abastece 11 cidades, beneficiando cerca de 500 mil pessoas. O sistema é alimentado por nove estações elevatórias, seis *stand-pipes* e sete estações principais de tratamento de água (PERNAMBUCO, 2010).

O nível de água em Jucazinho atingiu o volume morto em 2015. Depois disso, todas as cidades abastecidas pelo sistema tiveram que iniciar o racionamento de água e, em alguns casos, a população foi abastecida por caminhões-pipa. Somente em 2020, com a recuperação do armazenamento, o abastecimento começou a se recuperar. Esse cenário de incertezas e carências de provisão reforçou a necessidade da utilização de metodologias robustas que garantam a operação segura do sistema e o abastecimento pleno da população para prever colapsos e evitar vulnerabilidades.

Na Tabela 4, são mostradas informações importantes sobre o funcionamento do sistema e as principais características infraestruturais responsáveis por modelar a distribuição de vazões no SSD para os 11 municípios cujo abastecimento pode ter aporte de Jucazinho. Convém destacar que o custo unitário varia a depender das linhas adutoras principais utilizadas, a Norte ou a Sul, bem como a operação do sistema em período de ponta e fora de ponta do setor elétrico. O período fora de ponta compreende o intervalo do dia cujo consumo de energia elétrica é mais baixo e, por isso, as tarifas não sofrem nenhum acréscimo.

Essa estratégia estimula o consumo fora do período de ponta, garantindo um maior aproveitamento da capacidade das linhas de transmissão, sem superdimensionamento do sistema. Os comprimentos informados na Tabela 4 referem-se a trechos onde há o bombeamento da água, sendo descartadas as distâncias cujo escoamento se dá por gravidade. Além disso, a elevação relaciona-se a um ponto comum da infraestrutura de abastecimento dos centros de consumo e, por isso, assume valores iguais.

Tabela 4 - Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pelo sistema de Jucazinho.

Município	Comprimento (km)	Diâmetro (mm)	Elevação (m)	C*	Custo unitário de ponta (RS/ kWh)	Custo unitário fora de ponta (RS/ kWh)
Ameixas	12,5	900	340	115	0,34385	0,15129
Caruaru	51,5	900	340	115	0,34385	0,15129
Cumaru	7,5	900	340	115	0,34385	0,15129
Passira	22,0	900	340	115	0,34385	0,15129
Riacho das Almas	31,0	900	340	115	0,34385	0,15129
Salgadinho	39,5	600	340	115	0,37915	0,16682
Santa Maria do Cambucá	54,5	600	340	115	0,37915	0,16682
Surubim	14,5	600	340	115	0,37915	0,16682
Toritama	58,0	600	340	115	0,37915	0,16682
Vertente do Lério	64,5	600	340	115	0,37915	0,16682
Vertentes	41,0	600	340	115	0,37915	0,16682

\* Coeficiente de rugosidade da equação de Hazen Willians.

Fonte: Autora (2021).

Nota: Elaborada com informações de COMPESA (2020a).

### 4.3 RESERVATÓRIO PRATA

O reservatório Prata tem seu eixo barrável localizado em terras do município de São Joaquim do Monte, pela margem direita, e do município de Belém de Maria, pela margem esquerda, na bacia hidrográfica do rio Una. O processo de licenciamento, iniciado em 1995, contemplou ainda, um sistema adutor com extensão de 38 km, que está localizado ao longo da

faixa de domínio da PE-120 e BR-104, que ligam as cidades de Catende a Caruaru e custo estimado em R\$ 4.787.474,18 (SILVA, 2016).

O reservatório Prata foi concluído em 1998, assim como a adutora que transporta água para cinco municípios da área de estudo, sendo construído com o objetivo de complementar o abastecimento público de água da cidade de Caruaru, Pernambuco. O reservatório está situado no município de Bonito, na região Agreste do Estado de Pernambuco, e tem capacidade máxima de acumulação de 42 hm<sup>3</sup>. A área que drena para o reservatório Prata possui rios perenes devido ao clima mais úmido. A área de influência indireta do ponto de vista antrópico, foi definida pelos municípios de São Joaquim do Monte, Belém de Maria e Bonito, onde situa-se o reservatório e a área de desapropriação. Com relação ao controle de enchentes, o reservatório do Prata exerce pouca influência nos problemas das cheias que ocorrem na bacia do Una, em decorrência da grande extensão do sangradouro (COTEC, 1995).

No Quadro 3, são mostradas algumas características importantes sobre o reservatório Prata. Na Tabela 5, são apresentadas as principais informações que caracterizam a infraestrutura do Sistema do Prata para abastecimento dos municípios. Dentre os 18 municípios analisados, apenas 7 podem ser abastecidos pelo Prata, os demais apresentam limitações infraestruturais e operacionais que impedem o transporte de água atualmente.

Quadro 3 - Características do reservatório Prata.

<b>Capacidade máxima</b>	42 hm <sup>3</sup>
<b>Cota de coroamento</b>	397 m
<b>Cota da soleira do vertedouro</b>	393,5 m
<b>Extensão do vertedouro</b>	25 m
<b>Usos pretendidos</b>	Abastecimento público e piscicultura
<b>Corpo d'água</b>	Rio Prata
<b>Município</b>	São Joaquim do Monte, Belém de Maria e Bonito

Fonte: Autora (2021).

Nota: Elaborado com informações de APAC (2021) e COTEC (1995).

Tabela 5 - Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pelo sistema do Prata.

<b>Município</b>	<b>Comprimento (km)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Elevação (m)</b>	<b>C</b>	<b>Custo unitário de ponta (R\$/kWh)</b>	<b>Custo unitário fora de ponta (R\$/kWh)</b>
Agrestina	16,0	1300	412	115	0,39139	0,25440
Altinho	32,0	1300	412	115	0,39139	0,25440
Cachoeirinha	78,5	1300	412	115	0,39139	0,25440
Caruaru	40,0	1300	412	115	0,39139	0,25440
Ibirajuba	50,5	1300	412	115	0,39139	0,25440
Santa Cruz do Capibaribe	113,2	1300	412	115	0,39139	0,25440
Toritama	76,5	1300	412	115	0,39139	0,25440

Fonte: Autora (2021).

Nota: Elaborada com informações de COMPESA (2020a).

#### 4.4 ADUTORA DO PIRANGI

O sistema adutor de água bruta do Pirangi é formado por uma adutora e duas elevatórias para captação de água do rio Pirangi, no município de Catende em Pernambuco. As obras foram concluídas em 2017 e derivam do Projeto de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco – PSH/PE. O PSH/PE é um projeto do Governo do Estado, financiado, em parte, pelo Banco Mundial – BIRD, tendo como executores a Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de Pernambuco – SDEC/PE e a Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA. Tem como principal objetivo ampliar o acesso à água, em qualidade e quantidade adequadas, e ao saneamento básico no Estado de Pernambuco (COMPESA, 2016).

O rio Pirangi é o principal afluente do rio Una e é parcialmente responsável pela ocorrência de enchentes em cidades daquela região. A Adutora de água bruta do Pirangi, cuja captação é às margens desse rio, em trecho localizado na zona rural do Município de Catende, permite a adução de 500 L/s até a Estação Elevatória 1 do sistema adutor do reservatório Prata, permitindo assim o aumento de oferta de água para aproximadamente 800.000 habitantes. Essa obra permitiu minimizar as consequências da estiagem ocorrida nos últimos anos nas regiões do Agreste e Sertão do Estado, que provocou um colapso nas diversas barragens que atendem aos municípios da área de estudo (COMPESA, 2016).

Na Tabela 6, são mostradas informações importantes sobre as características da Adutora do Pirangi e os municípios que esta abastece. No total, 7 municípios podem ser abastecidos pelo sistema, são estes: Agrestina, Altinho, Cachoeirinha, Caruaru, Ibirajuba, Santa Cruz do Capibaribe e Toritama. Por falta de informações tarifárias disponíveis, foi adotado que os custos unitários de ponta e fora de ponta do setor elétrico são iguais aos do sistema Prata.

Tabela 6 - Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pela Adutora do Pirangi.

Município	Comprimento (km)	Diâmetro (mm)	Elevação (m)	C	Custo unitário de ponta (R\$/kWh)	Custo unitário fora de ponta (R\$/kWh)
Agrestina	43,0	700	337	130	0,39139	0,25440
Altinho	59,0	700	337	130	0,39139	0,25440
Cachoeirinha	105,5	700	337	130	0,39139	0,25440
Caruaru	67,0	700	337	130	0,39139	0,25440
Ibirajuba	77,5	700	337	130	0,39139	0,25440
Santa Cruz do Capibaribe	140,2	700	337	130	0,39139	0,25440
Toritama	103,5	700	337	130	0,39139	0,25440

Fonte: Autora (2021).

Nota: Elaborada com informações de COMPESA (2020a).

#### 4.5 ADUTORA DE SERRO AZUL

O sistema capta água na barragem de Serro Azul, em Palmares, com capacidade para transportar 500 L/s até o ponto de interligação com a Adutora do Agreste entre os municípios de Caruaru e Bezerros. O sistema adutor de Serro Azul tem investimentos previstos na ordem de R\$ 200 milhões do Governo do Estado de Pernambuco, com recursos financiados pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID, totalizando 58 quilômetros de adutoras e subadutoras que se interligarão às estações de tratamento de Santa Cruz do Capibaribe e Toritama, através da Adutora do Agreste. A água será bombeada através de quatro estações elevatórias e será necessária a construção de um reservatório apoiado nas proximidades da localidade de Encruzilhada de São João, em Bezerros, Pernambuco. Do total investido, em 2019 houve um desembolso de R\$ 30,5 milhões de reais (COMPESA, 2020b).

Atualmente, existe interligações entre os sistemas Jucazinho, Prata e Pirangi que possibilitam a transferência de água para a cidade de Caruaru. Quando a Adutora de Serro Azul for concluída em 2021, será possível escolher qualquer uma dessas fontes de água para abastecer os municípios da região de acordo com os custos de bombeamento e a disponibilidade hídrica. Com a conclusão do Adutora do Agreste, a integração será ampliada para permitir a otimização do abastecimento dos municípios. Na Tabela 7, são apresentadas as principais características infraestruturais do sistema relativas aos três municípios abastecidos dentre os 18 analisados: Caruaru, Bezerros e Gravatá. Semelhantemente ao que foi adotado para a Adutora do Pirangi, os custos unitários de ponta e fora de ponta foram considerados iguais aos do sistema Prata.

Tabela 7 - Informações infraestruturais dos municípios abastecidos pela Adutora de Serro Azul.

<b>Município</b>	<b>Comprimento (km)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Elevação (m)</b>	<b>C</b>	<b>Custo unitário de ponta (R\$/kWh)</b>	<b>Custo unitário fora de ponta (R\$/ kWh)</b>
Caruaru	51	730	613	130	0,3914	0,2544
Bezerros	38	730	613	130	0,3914	0,2544
Gravatá	38	730	613	130	0,3914	0,2544

Fonte: Autora (2021).

Nota: Elaborada com informações de COMPESA (2020a).

#### 4.6 ADUTORA DO AGRESTE

A história do Ramal do Agreste está atrelada à do Eixo Leste e, conseqüentemente, ao antigo Projeto de Transposição do Rio São Francisco (PTSF) e sua versão atual revisada, denominada Projeto de Integração do São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional (PISF). O PISF complementa e amplia sua área de abrangência através do eixo leste, de onde partem o Ramal do Agreste e a adutora. A Adutora do Agreste é um empreendimento do Governo Federal do Brasil, executado através do Ministério da Integração Nacional. A fonte hídrica do sistema é o reservatório Ipojuca, ponto final do Ramal do Agreste, que beneficiará a região com a adução de 8 m<sup>3</sup>/s do eixo leste do PISF (CPRH, 2009).

Após o tratamento, a água será conduzida por um sistema de adução de água formado por tubulações de aço e de ferro fundido, com diâmetros variando de 1500 a 2000 mm. O eixo principal de adução de água se dará ao longo da rodovia federal BR-232, com extensão aproximada de 125 km, passando pelas cidades de Belo Jardim, Tacaimbó, São Caetano, Caruaru, Bezerros e Gravatá. Isso confirma a concepção adotada para o sistema que preconizou que o traçado das adutoras deveria privilegiar as condições de relevo naturais e se desenvolver ao longo do sistema viário, como forma de minimizar problemas ambientais, desapropriações e custos de manutenção (CPRH, 2009).

A Adutora do Agreste configura-se como um dos maiores sistemas integrados do mundo e atenderá com abastecimento de água 68 sedes municipais, 80 aglomerados urbanos e a população rural de uma faixa de 2,5 quilômetros ao longo do seu percurso, totalizando a implantação de cerca de 1.500 quilômetros de adutoras que transportam água do Rio São Francisco à região que apresenta o menor balanço hídrico no país. A obra beneficiará uma população de 2 milhões de habitantes, com um investimento total estimado em R\$ 3,2 bilhões de reais (COMPESA, 2020b). Para operação do sistema, a companhia terá que arcar com um custo fixo de 0,236 R\$/m<sup>3</sup> sobre o volume de abastecimento contratado e um custo variável médio estimado em 0,508 R\$/m<sup>3</sup> sobre o volume efetivamente consumido.

A 1ª Etapa, com valor total R\$ 1,4 bilhão e recursos do Governo Federal e contrapartida do Governo do Estado de Pernambuco, está em execução e já foram assentados 602 quilômetros de adutora, o que corresponde a 78% da obra e beneficia 23 cidades. Desse total, os municípios de Arcoverde, Pesqueira, Belo Jardim, Sanharó, Tacaimbó, São Bento do Una e Alagoinha já estão recebendo água do São Francisco por meio da integração da Adutora do Agreste com a Adutora do Moxotó. Até o final de 2020, estava previsto o atendimento das cidades de Brejo da Madre de Deus e São Caetano. Já a 2ª Etapa, com valor total de R\$ 1,8 bilhão, ainda será

iniciada e beneficiará 45 cidades com um trecho de 724 quilômetros de adutora (COMPESA, 2020b).

Com a falta de um prazo efetivo para conclusão do Ramal do Agreste, um plano de ação foi elaborado pelo Governo do Estado de Pernambuco, por meio da COMPESA, para garantir a funcionalidade da Adutora do Agreste a partir de sua conclusão. Esse plano contemplou, além da execução da obra Adutora do Moxotó e Poços de Tupanatinga, obras com recursos de outras fontes como, por exemplo, Adutora de Pirangi, Adutora de Serro Azul e Adutora do Alto Capibaribe. Esse conjunto de obras complementares permitirão antecipar a funcionalidade para atendimento aos 23 municípios da 1ª Etapa da Adutora do Agreste, e antecipará o atendimento da 2ª Etapa da Adutora do Agreste para as cidades de Jataúba, Vertentes, Vertente do Lério, Santa Maria do Cambucá, Taquaritinga do Norte, Frei Miguelinho e Brejo da Madre de Deus (COMPESA, 2020b).

## 5 METODOLOGIA

O modelo proposto foi desenvolvido na linguagem de programação Python através do *integrated development environment* (IDE) livre PyCharm Community 2020.1. Python é uma linguagem de programação interpretada, orientada a objetos e de alto nível com semântica dinâmica, capaz de suportar módulos e pacotes e permitir a programação modularizada. Devido a sua simplicidade, compatibilidade e capacidade oferecer suporte a outras linguagens, tornou-se bastante popular, sendo bastante utilizado inclusive pela comunidade científica para análise de dados. Todos os processos foram realizados em um notebook com processador Intel Core i3-5005U com 2,00 GHz e 4 GB de memória RAM.

É clara a necessidade do desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão para alocação de recursos hídricos, principalmente em condições de múltiplas fontes de abastecimento de água e escassez hídrica, que tornam a análise do sistema ainda mais desafiadora. Dada a complexidade do problema avaliado, um algoritmo *particle swarm optimization* (PSO) é proposto para garantir a alocação eficiente de vazões das múltiplas fontes para os centros de consumo. O SSD deve ser capaz de minimizar os custos operacionais, considerando os cenários de disponibilidade de recursos hídricos e as limitações infraestruturais dos sistemas. Dessa forma, a solução ótima de operação deve ser definida pelos seguintes critérios:

- Critérios hídricos → cenários de disponibilidade hídrica através do zoneamento operacional de reservatórios.
- Critérios técnicos → atendimento das demandas impostas pelos sistemas de distribuição de água, infraestrutura de transporte, armazenamento e tratamento de água.
- Critérios econômicos → otimização dos custos com energia elétrica.

A eficácia do modelo de alocação de vazões está diretamente ligada à capacidade do método de otimização adaptar-se ao local de estudo. Por isso, o detalhamento do método de otimização é de extrema importância para obtenção de melhores resultados e séries hidrometeorológicas, informações relativas a custos de operação do sistema, discriminação de fontes e demandas conflitantes, curvas de operação dos reservatórios e características infraestruturais do sistema devem ser fornecidos como parâmetros de entrada do modelo.

Além disso, é importante mensurar a influência do percentual inicial de acumulação dos reservatórios na análise. Esse estudo de sensibilidade foi realizado através da definição de

cenários de armazenamento inicial dos reservatórios, permitindo assim investigar a viabilidade das soluções sob condições externas distintas. Na Tabela 8, são mostrados os cenários propostos para análise, embasados em informações registradas nos boletins de monitoramento de reservatórios da APAC (APAC, 2021) e no portal de notícias da COMPESA (COMPESA, 2021). Os cenários foram aplicados às duas dimensões de planejamento: consumo atual (estimado em 2014) e projeção para 2037.

Tabela 8 - Percentuais iniciais de armazenamento dos reservatórios nos cenários analisados.

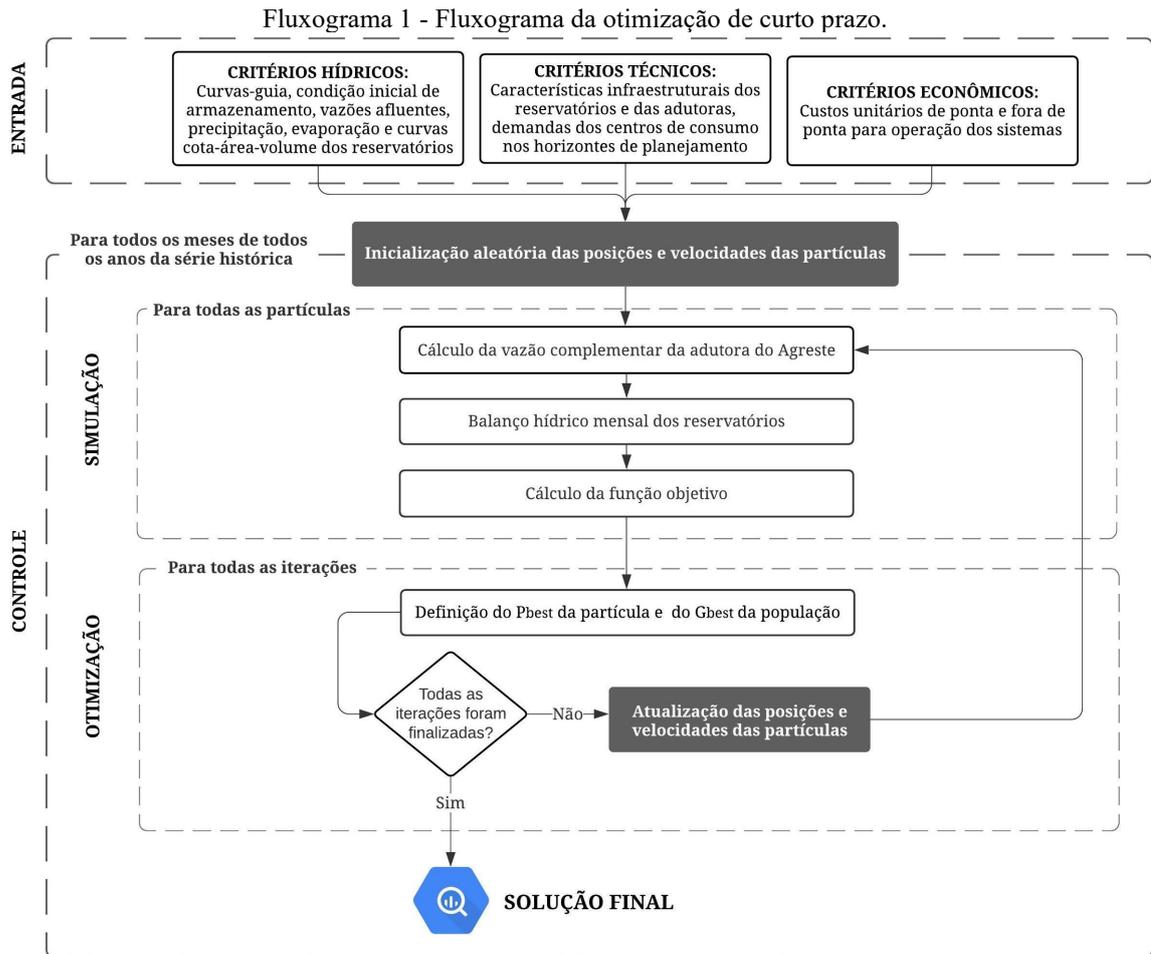
Reservatório	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Jucazinho	10%	15%	25%	30%	50%
Prata	80%	50%	25%	60%	50%

Fonte: Autora (2021).

## 5.1 SIMULAÇÃO DE CURTO PRAZO

São fornecidos parâmetros de entrada de natureza hídrica, técnica e econômica ao SSD que permitem simular com maior segurança a operação dos sistemas. Os critérios hídricos descrevem condições importantes para o funcionamento dos reservatórios como, por exemplo, curvas-guia e cota-área-volume, percentual inicial de acumulação dos reservatórios e séries históricas de vazão afluente, precipitação e evaporação. Os critérios técnicos caracterizam a infraestrutura do sistema através da disponibilização de diâmetros, constantes de rugosidade e comprimentos dos trechos, elevações e capacidade máxima de transporte das adutoras. Já os critérios econômicos são os custos unitários associados às tarifas em horário de ponta e fora de ponta do setor elétrico, além de custos pelo consumo da água e tarifas fixas.

A inicialização das posições das partículas ocorre randomicamente por regras da distribuição uniforme a partir de um intervalo pré-definido. As variáveis de decisão devem assumir valores fisicamente possíveis e restritos a condições de demanda dos centros de consumo e de disponibilidade hídrica das fontes. No Fluxograma 1, é mostrado o fluxograma do SSD aplicado à simulação de curto prazo. O processo de controle permite realizar a operação de otimização para cada mês de cada ano da série histórica independentemente, gerando um conjunto de soluções mensais. A cada iteração da otimização, o processo de simulação é calculado para a quantidade total da população de partículas, fornecendo informações que são posteriormente comparadas e oferecem subsídio para tomada de decisão.



Fonte: Autora (2021).

No processo de simulação, realiza-se o balanço hídrico dos reservatórios Jucazinho e Prata mês a mês durante todo o período de março de 1973 a fevereiro de 2017, obtendo a vazão captável diária a partir do zoneamento operacional do reservatório e das vazões retiradas nos dias anteriores pelo SSD. O SSD de simulação de curto prazo gera um conjunto de vazões alocadas para cada mês em cada ano da série histórica partindo de uma condição inicial de armazenamento fornecida pelo usuário. Para o mês de janeiro, por exemplo, seria fornecido um conjunto de soluções relativo ao intervalo de 1974 até 2017, totalizando 44 possibilidades de solução a serem implantadas.

Cabe ao decisor, posteriormente, avaliar por qual caminho seguir a depender da similaridade do regime de vazões afluentes e precipitações do ano de análise com os anos da série histórica. É possível optar por uma solução de captação mais ou menos intensa para determinada fonte hídrica ou até mesmo uma solução média dentre as simulações da série histórica. Para qualquer cenário, o conjunto de soluções gerado respeita as limitações infraestruturais e disponibilidade hídrica das fontes de abastecimento de água, além de gerar menores custos de operação do sistema.

### 5.1.1 Variáveis de decisão

O processo de otimização de curto prazo corresponde à alocação de água de  $j = 1, 2, \dots, NF$  fontes hídricas para  $i = 1, 2, \dots, NC$  centros de consumo. As variáveis de decisão foram o conjunto de vazões ( $q_{i,j}$ ) que pode ser captada de cada reservatório ou transportada através dos três sistemas adutores que compõem as transferências de água entre bacias. A Adutora do Agreste pode contribuir para o abastecimento integral da demanda dos centros de consumo, porém, por ser a fonte mais distante, sua contribuição ocorre justamente quando é necessária a complementação das demais fontes. O cálculo da vazão complementar fornecida pela Adutora do Agreste é dado pela Equação 6.

$$q_i^* = d_i - \sum_{j=1}^{NF-1} q_{i,j} \mid q_{i,j} \in R_+ \quad (6)$$

Tal que  $q_{i,j}$  é a vazão captada da fonte  $j$  para o centro de consumo  $i$ , exceto para Adutora do Agreste que complementa a demanda  $d_i$  com a descarga  $q_i^*$  todos os dias.

### 5.1.2 Restrições

Tratando-se de um problema de otimização real e restrito, a solução está sujeita às seguintes restrições para que seja considerada factível e aplicável na área de estudo:

**A. Requisitos técnicos**  $\rightarrow q_{i,j}$  nulo  $\forall i, j$  que não apresente infraestrutura de transporte, armazenamento e tratamento de água ou quaisquer outras limitações operacionais que impeçam a alocação de vazão da fonte hídrica  $j$  para o centro de consumo  $i$ . O modelo garante o atendimento dessa restrição atribuindo o valor nulo às posições e velocidades das variáveis de decisão que tenham sido categorizadas nos dados de entrada como “sem alocação”.

**B. Abastecimento integral da demanda**  $\rightarrow$  o SSD deve garantir o abastecimento integral da demanda requerida, sem excedentes ou faltas. Dessa forma, ao fim de cada iteração, as posições das partículas são verificadas e, se necessário, corrigidas proporcionalmente para garantir o atendimento da Equação 7.

$$d_i = q_i^* + \sum_{j=1}^{NF-1} q_{i,j} \quad (7)$$

**C. Vazões máximas** → A soma das vazões alocadas para os centros de consumo de uma determinada fonte não pode exceder sua disponibilidade, seja a vazão captável do reservatório no dia mais crítico do mês ou a máxima vazão transportável pela adutora. Tendo isso em vista, a Equação 8 deve ser atendida para que a função objetivo não seja penalizada.

$$\sum_{i=1}^{NC} q_{i,j} \leq Q_{j,\min} \quad \forall j \quad (8)$$

Tal que  $Q_{j,\min}$  representa a vazão que pode ser captada ou transportada da fonte  $j$  no dia mais crítico do mês analisado.

### 5.1.3 Função objetivo

O SSD para simulação de curto prazo busca encontrar soluções viáveis economicamente que respeitem restrições infraestruturais, operacionais e de disponibilidade hídrica das fontes. Para isso, a função objetivo a ser otimizada depende diretamente dos custos de operação dos sistemas e de penalizações capazes de guiar o modelo pelo espaço de busca, conforme mostrado na Equação 9. A função de penalização é baseada nas restrições do problema e, na simulação de curto prazo, garante que as vazões máximas captáveis não sejam excedidas.

$$\text{Min FO} = \text{CO} + \text{Pen} \quad (9)$$

Tal que FO é a função objetivo a ser minimizada, CO é o custo operacional total para operação do sistema e Pen corresponde à função de penalização.

**Custos operacionais (CO)** → A função CO expressa os custos de energia associados ao transporte de água dos reservatórios e Adutoras do Pirangi e de Serro Azul somados ao custo de abastecimento da Adutora do Agreste, sendo calculada através das Equações 10-12:

$$\text{CO} = \sum_{i=1}^{NC} \sum_{j=1}^{NF-1} \frac{Y \cdot q_{i,j} \cdot H_{\text{man } i,j}}{1000 \cdot \eta} \cdot N \cdot e_{i,j} + \sum_{i=1}^{NC} q_i^* \cdot N \cdot 3600 \cdot (c_F + c_V) \quad (10)$$

$$H_{\text{man } i,j} = \Delta Z_{i,j} + S_{f i,j} \cdot L_{i,j} \quad (11)$$

$$S_{f_{i,j,t}} = \frac{10,64 \cdot q_{i,j}^{1,85}}{C_{i,j}^{1,85} D_{i,j}^{4,87}} \quad (12)$$

Tal que  $S_{f_{i,j}}$  é a perda de carga unitária calculada pela fórmula de Hazen-Williams do trecho  $i - j$  em unidades SI,  $\Delta Z_{i,j}$  é a altura de elevação para bombeamento,  $L_{i,j}$  é o comprimento,  $D_{i,j}$  é o diâmetro,  $C_{i,j}$  é o coeficiente de rugosidade do trecho,  $H_{man_{i,j}}$  é a altura manométrica do trecho,  $\gamma$  é o peso específico da água,  $\eta$  é a eficiência do conjunto motor-bomba,  $N$  é o número de horas de operação diária,  $e_{i,j}$  é o custo de energia (R\$/kWh) do trecho,  $c_F$  é o custo unitário fixo (R\$/m<sup>3</sup>) da Adutora do Agreste, e  $c_V$  é o custo unitário (R\$/m<sup>3</sup>) da Adutora do Agreste.

Convém destacar que, para vazões inferiores a 40% de  $d_i$ ,  $e_{i,j}$  assume a tarifa fora de ponta correspondente, sendo usada a tarifa de ponta do setor elétrico para a vazão excedente. Essa abordagem permite ao sistema otimizar os custos energéticos da distribuição de vazões e aproveitar as tarifas mais baixas em faixas horárias pré-definidas, feriados e fins de semana.

**Penalização das vazões máximas (Pen)** → Para que a alocação de vazões respeite as limitações de vazões captáveis dos reservatórios e de transporte das adutoras, é utilizada a função da penalização mostrada na Equação 13.

$$Pen = \sum_{j=1}^{NF-1} \beta \cdot \text{Máximo} (0, \sum_{i=1}^{NC} q_{i,j} - Q_{min,j}) \quad (13)$$

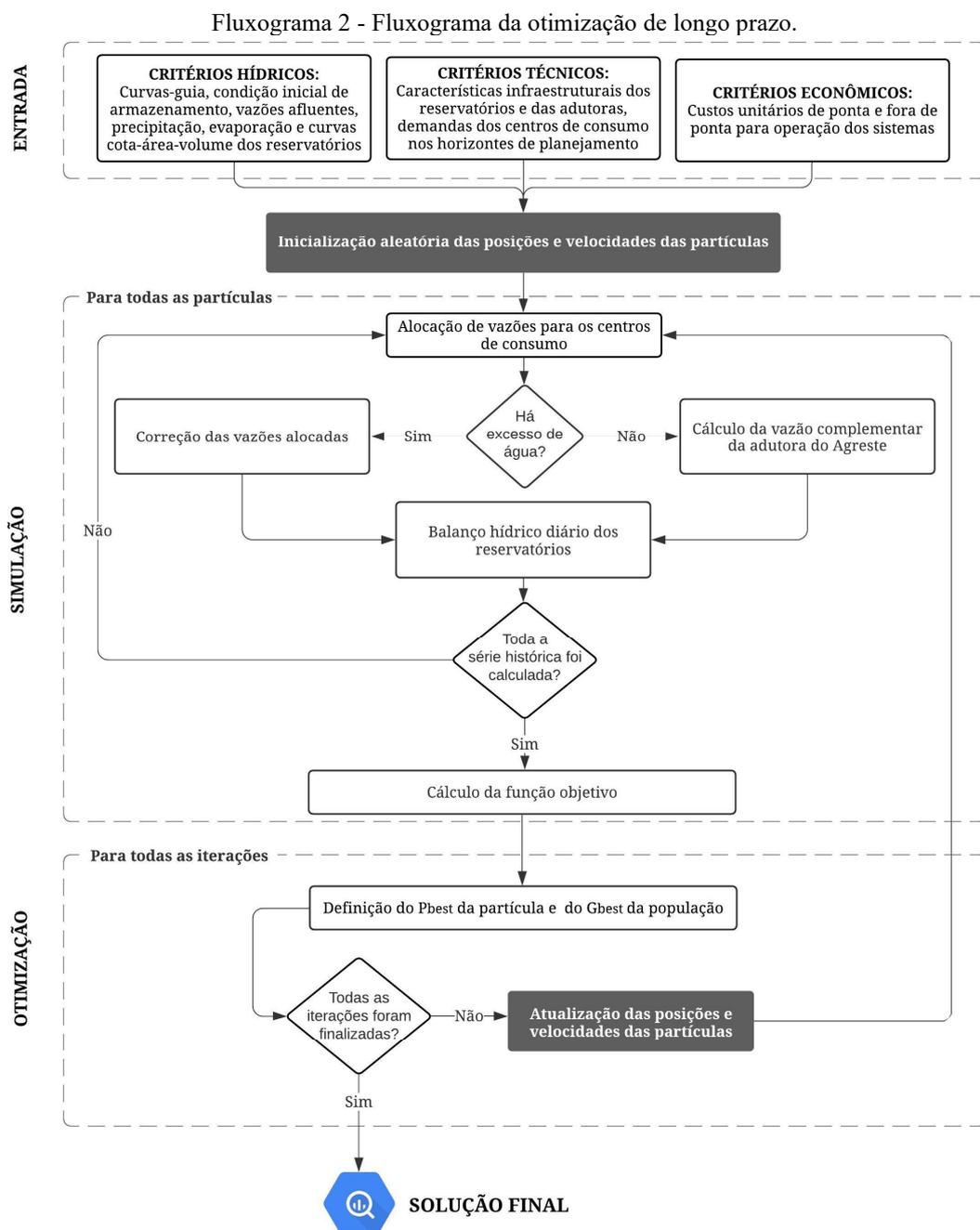
Tal que  $\beta$  é o fator de penalização responsável por ajustar a ordem de grandeza da penalização na função objetivo, de modo a garantir que sejam evitadas pela população regiões não factíveis sem impedir a busca por boas soluções em regiões limítrofes. Através de simulações e testes, ficou definido que o fator de penalização  $\beta$  adotado seria igual a  $10^4$ .

## 5.2 SIMULAÇÃO DE LONGO PRAZO

O SSD para simulação de longo prazo gera uma solução única, dependente das disponibilidades hídricas diárias das fontes e capaz de apresentar um ótimo desempenho operacional médio, considerando toda a série histórica de março de 1973 até fevereiro de 2017. Durante a simulação, dependendo do estado de armazenamento nos reservatórios, a soma das vazões alocadas das fontes pode ser maior que a demanda total. Quando isso ocorre, o algoritmo

reduz as vazões proporcionalmente para que não haja excesso de água. Caso contrário, a vazão da Adutora do Agreste complementa o abastecimento da demanda.

Dessa forma, as vazões alocadas são calculadas e ajustadas dia a dia, garantindo o abastecimento integral da demanda sem excedentes de água. Assim como na otimização de curto prazo, a cada iteração do processo de otimização, é realizada a simulação do desempenho de cada uma das partículas da população, permitindo posteriores comparações e a obtenção da solução ótima final a ser implantada na área de estudo. No Fluxograma 2, é mostrado o fluxograma da otimização de longo prazo.



Fonte: Autora (2021).

### 5.2.1 Variáveis de decisão

Semelhantemente à simulação de curto prazo, a otimização de longo prazo busca alocar vazões de  $j = 1, 2, \dots, NF$  fontes hídricas para  $i = 1, 2, \dots, NC$  centros de consumo. As variáveis de decisão foram o conjunto de valores percentuais  $(X_{i,j})$  da vazão máxima  $Q_{j,t}$  que pode ser captada de cada reservatório ou transportada através dos três sistemas de adutoras que compõem as transferências de água entre bacias. É importante destacar que  $X_{i,j}$  assume valores maiores ou iguais a zero e que a soma dos percentuais de qualquer fonte  $j$  pode ser superior a 100%, visto que, devido aos ajustes diários nas retiradas, as vazões são reduzidas quando excedem as demandas das cidades em qualquer dia do processo de otimização

### 5.2.2 Restrições

Tratando-se de um problema de otimização real e restrito, a solução está sujeita às seguintes restrições para que seja considerada factível e aplicável na área de estudo:

**A. Requisitos técnicos** → Como já discutido, essa restrição busca impedir a alocação de vazões de fontes hídricas para centros de consumo, cujo transporte de água não seja possível seja por questões infraestruturais ou operacionais. A abordagem é a mesma utilizada na otimização de curto prazo.

**B. Percentuais máximos** → A soma das vazões corrigidas alocadas para os centros de consumo de uma determinada fonte  $j$  em qualquer período  $t$  não pode ser superior a  $Q_{j,t}$ , o que significa dizer que o percentual de aproveitamento diário da fonte não deve ser superior a sua total capacidade. Para isso, são calculados os percentuais diários de aproveitamento de cada fonte (Equação 14) e o valor máximo é comparado a um valor de referência. A restrição é atendida se o percentual máximo registrado na série histórica de qualquer fonte  $j$  for menor ou igual a 1, caso contrário a função objetivo é penalizada, conforme Equação 15.

$$P_{j,t} = \frac{\sum_{i=1}^{NC} q_{c_{ij,t}}}{Q_{j,t}} \quad \forall j \quad (14)$$

$$P_{j,\max} = \text{Máximo}(P_{j,t}, \dots, P_{j,T}) \leq \sigma \quad \forall j \quad (15)$$

Tal que  $q_{c_{i,j,t}}$  é vazão corrigida final alocada da fonte  $j$  para o centro de consumo  $i$  no tempo  $t$ ,  $P_{j,t}$  é o percentual de aproveitamento da fonte  $j$  no tempo  $t$ ,  $T$  é igual ao número total de dias da série histórica,  $P_{j,\max}$  é o máximo percentual de aproveitamento da fonte  $j$  ao longo de toda a série histórica e  $\sigma$  é igual a 1.

### 5.2.3 Função objetivo

O SSD para simulação de longo prazo também é descrito pela Equação 9 e a penalização do sistema garante o atendimento da restrição de percentuais máximos de aproveitamento das fontes. Dessa forma, as parcelas CO e Pen podem ser detalhadas da seguinte forma:

**Custos operacionais (CO)** → A função CO expressa os custos médios de energia associados ao transporte de água dos reservatórios e Adutoras do Pirangi e de Serro Azul somados ao custo de abastecimento da Adutora do Agreste ao longo de toda a série histórica, sendo calculada através das Equações 16-18:

$$CO = \frac{1}{T} \cdot \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{NC} \sum_{j=1}^{NF-1} \frac{Y \cdot q_{c_{i,j,t}} \cdot H_{\text{man } i,j,t}}{1000 \cdot \eta} \cdot N \cdot e_{i,j} + \sum_{i=1}^{NC} q_{i,t}^* \cdot N \cdot 3600 \cdot c_v \right\} + \text{Máximo} \left( \sum_{i=1}^{NC} q_{i,t}^*, \dots, \sum_{i=1}^{NC} q_{i,T}^* \right) \cdot N \cdot 3600 \cdot c_F \quad (16)$$

$$H_{\text{man } i,j,t} = \Delta Z_{i,j} + S_{f i,j,t} \cdot L_{i,j} \quad (17)$$

$$S_{f i,j,t} = \frac{10,64 \cdot q_{c_{i,j,t}}^{1,85}}{C_{i,j}^{1,85} D_{i,j}^{4,87}} \quad (18)$$

Tal que  $S_{f i,j,t}$  e  $H_{\text{man } i,j,t}$  são, respectivamente, a perda de carga unitária pela fórmula de Hazen-Williams e a altura manométrica do trecho  $i - j$  no tempo  $t$ .

**Penalização dos percentuais máximos (Pen)** → A restrição dos percentuais máximos de aproveitamento das fontes é satisfeita através da penalização Pen, mostrada na Equação 19. Com a penalização da função objetivo, a alocação de vazões para o sistema não extrapola as disponibilidades hídricas dos reservatórios e limitações de transporte das adutoras.

$$Pen = \sum_{j=1}^{NF-1} \beta \cdot \frac{\sum_{t=1}^T Q_{jt}}{T} \cdot \text{Máximo}(0, P_{j,\max} - 1) \quad (19)$$

Tal que  $Q_{j,t}$  é a disponibilidade hídrica da fonte  $j$  no tempo  $t$ .

### 5.3 ZONEAMENTO OPERACIONAL DOS RESERVATÓRIOS

As simulações dos reservatórios Jucazinho e Prata foram realizadas com modelos que computaram todas as variáveis envolvidas no balanço hídrico com um intervalo de tempo diário, conforme indicado na Equação 20. A cada novo dia, é realizado o balanço hídrico diário separado em 6 intervalos de 4 horas de duração.

$$V_{t+1} = V_t + I_t - V_{\text{demanda}} - E_t \cdot A_t + P_t \cdot A_t - Vv_t \quad (20)$$

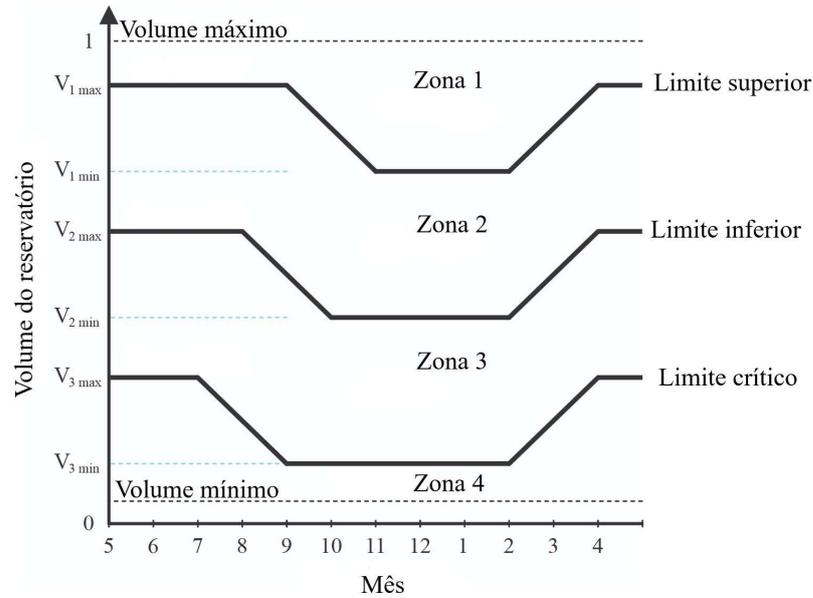
Tal que  $V_{t+1}$  é o volume no tempo  $t + 1$ ,  $V_t$  é o volume no início do intervalo de tempo  $t$ ,  $I_t$  é a entrada no reservatório no intervalo de tempo  $t$ ,  $V_{\text{demanda}}$  é o volume retirado de água definido pelo SSD,  $E_t$  é a lâmina de evaporação no intervalo de tempo  $t$ ,  $P_t$  é a precipitação na superfície da água,  $A_t$  é a área da superfície da água do reservatório no início do intervalo de tempo  $t$ , assumida constante para curtos períodos, e  $Vv_t$  é o transbordamento do vertedouro.

A etapa inicial baseia-se na definição da vazão máxima que pode ser retirada de cada reservatório em função do seu nível de acúmulo, sendo necessário calcular as curvas-guia dos volumes de retirada em função do volume inicial de armazenamento e do mês do ano. O conjunto de volumes de retirada foi calculado por meio de um processo de otimização de zoneamento geral da capacidade do reservatório para as regras de operação. Três curvas indicam os limites superior, inferior e crítico de armazenamento de água. A política operacional foi definida no status de armazenamento no início de cada período de tempo.

As regras de operação apresentadas na Figura 3 estabeleceram, para cada curva-guia, dois níveis de restrição separados por um período de transição. Em cada caso, a maior ou a menor duração depende do nível de acúmulo de água no reservatório, de forma que, quanto mais crítico, maior o tempo com restrição severa. As regras consideraram o ano hidrológico, iniciando-se no mês de maio, que é o início do período chuvoso. Para cada reservatório, as variáveis de decisão a otimizar foram:

- Vazão máxima a ser retirada ( $Q_{i,max}$ );
- Percentual dos volumes máximo e mínimo que definem as regras de operação ( $V_{k,max}, V_{k,min}$ );
- Níveis de redução aplicados sobre a vazão máxima ( $f_{i,c}$ ).

Figura 3 - Regras operacionais dos reservatórios baseadas no armazenamento de água durante os meses do ano.



Fonte: Autora (2021).

A função objetivo a ser maximizada foi a vazão média captável do reservatório  $i$  ( $Q_{med}^i$ ), estando o problema de otimização sujeito às seguintes restrições:

$$0 \leq Q_t^i \leq Q_{trans} \quad (21)$$

$$V_i^t \geq V_{i,min} \quad (22)$$

$$P_{Vmin} \leq V_{3,min} \leq V_{3,max} \leq V_{2,min} \leq V_{2,max} \leq V_{1,min} \leq V_{1,max} \leq 1 \quad (23)$$

$$V_{k,max} / V_{k,min} \geq \delta, \quad k = 1,2,3 \quad (24)$$

$$f_{i,c} \geq 0, \quad c = 1,2,3,4,5,6,7 \quad (25)$$

$$f_{i,c} \leq 1, \quad c = 1,2,3,4,5,6,7 \quad (26)$$

$$ND_{i,c} \leq ND_{i,c \max} \quad c = 1,2 \quad (27)$$

Tal que  $Q_{trans}$  é a capacidade de transporte,  $Q_t^i$  é a vazão captável no tempo  $t$ ,  $V_i^t$  é o volume de armazenamento no reservatório no tempo  $t$ ,  $V_{i,\min}$  é o mínimo volume do reservatório,  $P_{V\min}$  é a porcentagem do volume mínimo do reservatório,  $V_{i,\min}$ , que define a condição de colapso,  $V_{k \min}$  é o mínimo volume para a operação da curva-guia  $k$ ,  $V_{k \max}$  é o máximo volume para a operação da curva-guia  $k$ ,  $\delta$  é a razão mínima entre os volumes máximo e mínimo das curvas-guia  $k$ ,  $f_{i,c}$  são os fatores de redução aplicados a máxima vazão captável que pode ser extraída do reservatório, dependendo da porcentagem de acumulação.  $ND_{i,1}$ ,  $ND_{i,2}$  representam, respectivamente, o número de dias que o reservatório pode operar em regime de colapso e pré-colapso, respeitando os limites de 910 e 1460 dias, estabelecidos na equação 27 através dos parâmetros  $ND_{i,c \max}$ .

Na Equação 21, foi imposto limite à vazão captável a qualquer momento ( $Q_t^i$ ) correspondente à capacidade de transporte ( $Q_{trans}$ ). A Equação 22 limitou a operação do sistema a um armazenamento mínimo associado ao  $P_{V\min}$ , no qual o reservatório foi considerado em colapso abaixo deste nível. A Equação 23 limitou as porcentagens que representam as três curvas-guia, sendo  $P_{V\min}$  igual a 3% da capacidade de armazenamento do reservatório. A Equação 24 impôs uma distância entre as curvas considerando uma razão  $\delta$ , equivalente a 2; enquanto as Equações 25 e 26 impuseram limites para os redutores de vazão retirada relacionados a cada curva-guia, incluindo  $f_{i,7}$ , que correspondeu à situação quando o reservatório está na zona 4, mas acima do mínimo  $P_{V\min}$ . Esses redutores foram aplicados à vazão máxima retirada  $Q_{i,\max}$ , que é uma das variáveis de decisão. As outras variáveis de decisão foram  $V_{k \max}$ ,  $V_{k \min}$ ,  $f_{i,c}$ , resultando em 14 variáveis de decisão para otimizar em cada reservatório.

O problema de otimização foi resolvido através dos algoritmos Generalized Reduced Gradient (GRG2) e Evolutionary, ambos presentes no Suplemento Solver do Microsoft Excel. Ao final, o processo de otimização deve indicar os valores-limite diários de  $Q_t^i$  que podem ser liberados dos reservatórios, dependendo do volume de armazenamento em cada um, em associação com os outros três sistemas para compor o processo final de alocação de água para os centros de consumo.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A definição das curvas-guia e do regime operacional dos reservatórios são o resultado primário do processo de otimização, que servem de parâmetro de entrada dos modelos de simulação de curto e longo prazos. O conjunto de vazões captáveis baseia-se no status de armazenamento no início de cada período de tempo, garantindo a operação segura do sistema. Nesse contexto, as curvas-guia permitem o máximo aproveitamento da fonte sob estratégias operacionais definidas e limitadas a condições críticas de armazenamento dos reservatórios. Cada curva-guia é formada por patamares de restrição relativos aos períodos chuvosos e de estiagem conectadas entre si por zonas de transição.

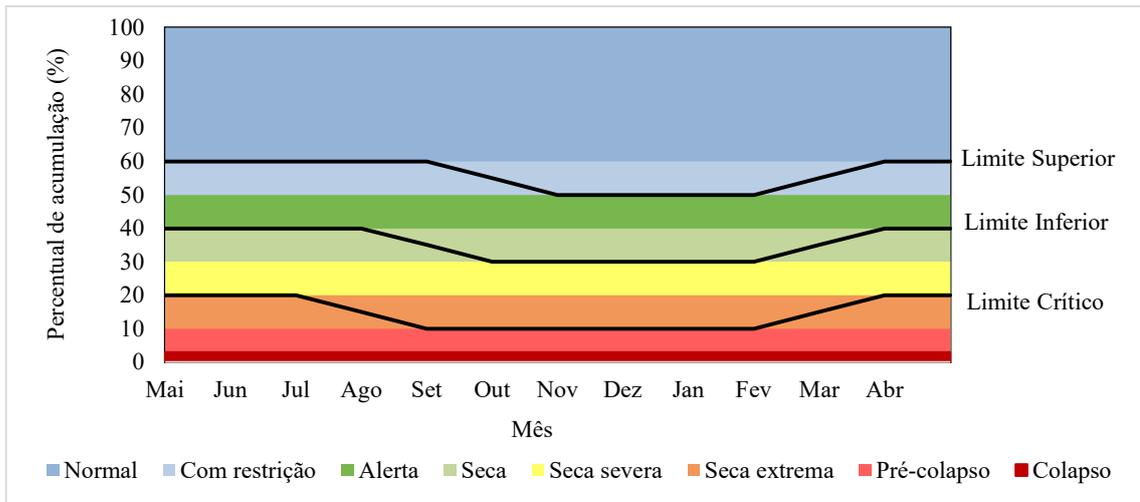
A definição de estratégias operacionais foi aplicada aos reservatórios Jucazinho e Prata, através dos algoritmos Generalized Reduced Gradient (GRG2) e Evolutionary, ambos presentes no Suplemento Solver do Microsoft Excel<sup>®</sup>. Na Tabela 9, são mostradas as variáveis de decisão do zoneamento operacional obtidas através do processo de otimização aplicado aos dois reservatórios: Jucazinho e Prata. Através dos percentuais dos volumes máximo e mínimo, as curvas-guia foram definidas e forneceram parâmetros para a distribuição de cenários de acumulação de água (colapso, pré-colapso, seca extrema, seca severa, seca, alerta, com restrição e normal), conforme pode ser visto na Figura 4.

Tabela 9 - Variáveis de decisão para o processo de otimização de zoneamento operacional dos reservatórios.

Variáveis de decisão	Jucazinho	Prata
$V_1 \text{ max}$	0,59	0,60
$V_1 \text{ min}$	0,50	0,50
$V_2 \text{ max}$	0,40	0,40
$V_2 \text{ min}$	0,20	0,30
$V_3 \text{ max}$	0,20	0,20
$V_3 \text{ min}$	0,10	0,10
$f_{i,1}$	0,88	0,85
$f_{i,2}$	0,73	0,70
$f_{i,3}$	0,68	0,60
$f_{i,4}$	0,52	0,45
$f_{i,5}$	0,33	0,30
$f_{i,6}$	0,23	0,15
$f_{i,7}$	0,10	0,05
$Q_{i,\text{max}}$	3,52 m <sup>3</sup> /s	1,00 m <sup>3</sup> /s

Fonte: Autora (2021).

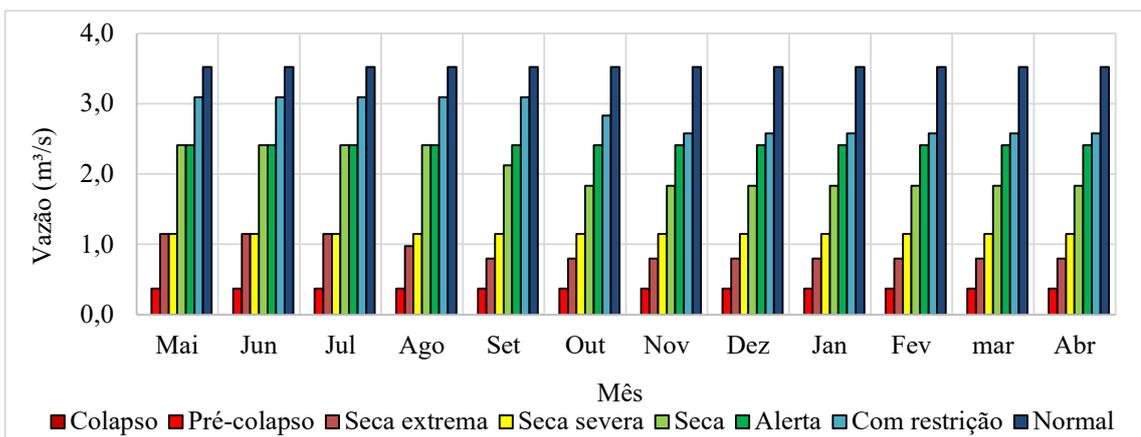
Figura 4 - Curvas-guia e cenários de operação dos reservatórios.



Fonte: Autora (2021).

Para o reservatório Jucazinho, o conjunto de vazões captáveis conduz a um processo de captação intenso, que é aceitável pela disponibilidade das demais fontes hídricas do sistema para abastecimento dos municípios. A vazão máxima captável é 3,52 m<sup>3</sup>/s, podendo ser nula a depender do cenário de armazenamento do reservatório e do mês do ano, como pode ser visto no Gráfico 2. Apesar da intensa captação no reservatório, a distribuição de vazões respeita a limitação da vazão de transporte adotada ( $Q_{trans}$ ) igual a 4,0 m<sup>3</sup>/s.

Gráfico 2 - Vazão máxima captável de Jucazinho para diferentes estados de armazenamento a cada mês.

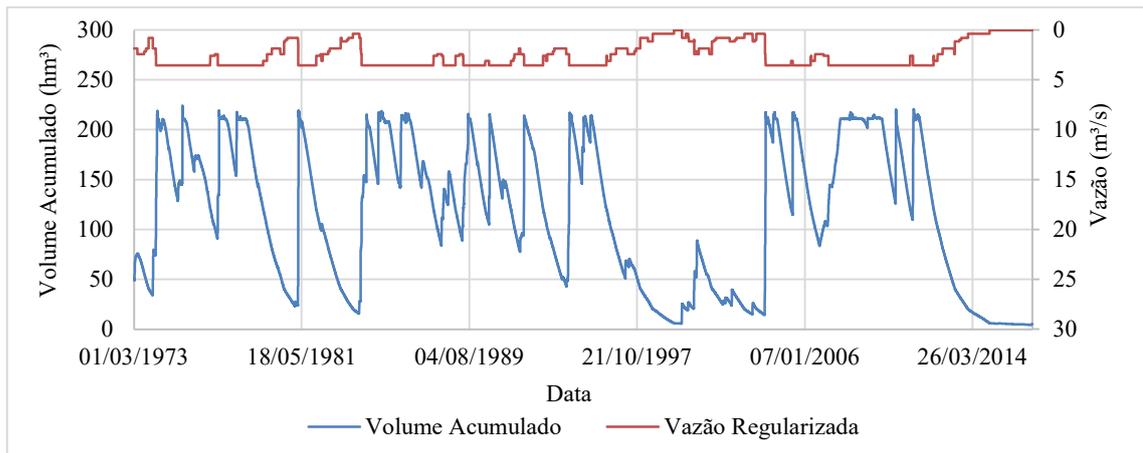


Fonte: Autora (2021).

Devido à operação do reservatório Jucazinho com máximo aproveitamento das vazões captáveis, percebe-se, no Gráfico 3, reduções drásticas no volume armazenado pelo reservatório. Supondo um nível inicial de 25% da capacidade de acumulação e simulando os 44 anos da série histórica, mensura-se um colapso por um período de tempo total igual a

2,5 anos no reservatório, apesar de operar em condições normais em quase metade do tempo de simulação. Os períodos mais críticos da análise são de setembro até dezembro de 1999 e janeiro de 2015 até fevereiro de 2017. Estes foram efetivamente os anos de seca mais severa ocorridas no período em análise. Convém salientar que cabe ao SSD ditar a distribuição de vazões, respeitando as máximas vazões captáveis estabelecidas pelas curvas-guia.

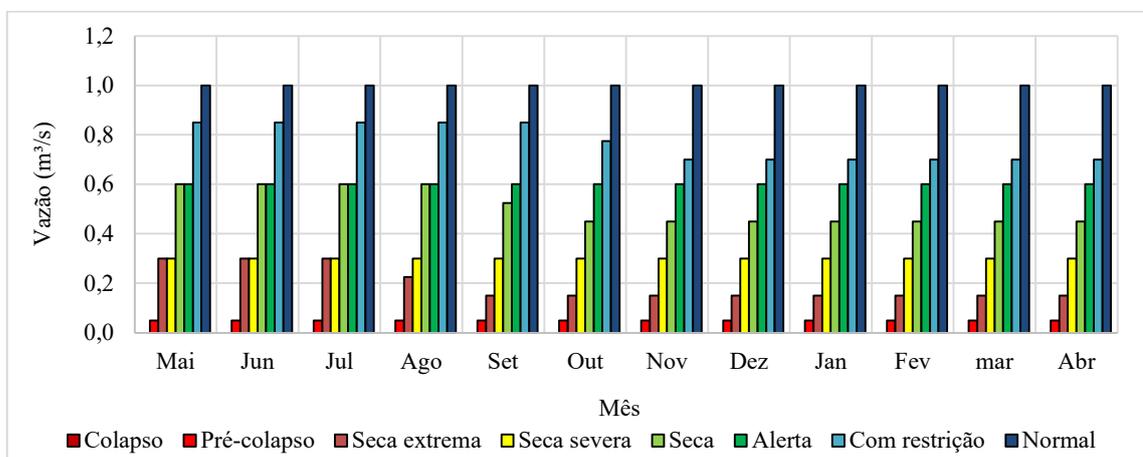
Gráfico 3 - Volume acumulado em Jucazinho com o máximo aproveitamento de vazões captáveis.



Fonte: Autora (2021).

O sistema adutor do Prata está sujeito à limitação da capacidade de transporte de água restrita a 1 m³/s. Dessa forma, o conjunto de vazões captáveis obtido através do zoneamento operacional do reservatório varia de zero, em condição de colapso, até à vazão máxima de transporte, em condições normais. Assim como para Jucazinho, as vazões captáveis variam a depender do mês de análise, de modo que na maioria dos cenários há aumento da vazão disponível em meses chuvosos, como pode ser visto no Gráfico 4.

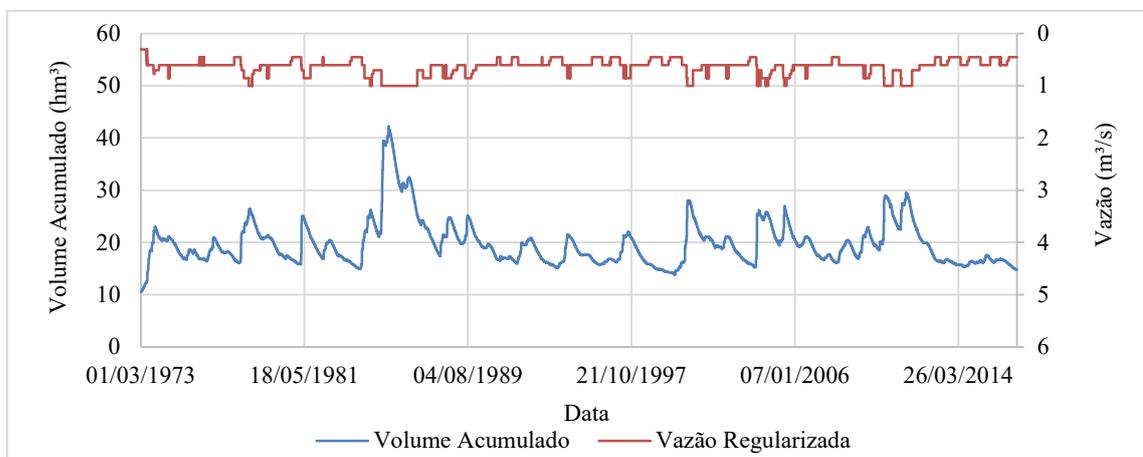
Gráfico 4 - Vazão máxima captável do Prata para diferentes estados de armazenamento a cada mês.



Fonte: Autora (2021).

Admitindo um volume de acumulação inicial igual a 25% da capacidade máxima do reservatório e simulando a série histórica de 1973 até 2017, é possível concluir que a restrição de transporte garante uma distribuição de volumes armazenados estável. Mesmo com a captação guiada pelo zoneamento operacional, a exploração do Prata fica aquém de seu potencial, como mostrado no Gráfico 5. A situação mais crítica da análise é o período inicial de março a junho de 1973, configurando uma seca severa, cujos percentuais de armazenamento do reservatório variam entre 20 e 30%. Nos meses de maio a novembro de 1985, o reservatório opera com capacidade superior a 90% da capacidade máxima de armazenamento.

Gráfico 5 - Volume acumulado no Prata com o máximo aproveitamento de vazões captáveis.



A definição de regime de vazões captáveis mensais aliada às demais informações hídricas, técnicas e econômicas da área de estudo oferecem subsídio para os processos centrais do trabalho: alocação de vazões do sistema através da simulação de curto prazo e de longo prazo. Cada uma das simulações é feita para 5 cenários propostos para os reservatórios, buscando identificar a influência do percentual inicial de acumulação dos reservatórios na viabilidade da solução. Essa análise de sensibilidade, guiada pela comparação dos custos operacionais e das vazões alocadas das fontes para os centros de consumo, permite prever as tendências de comportamento do processo de otimização e definir qual o tipo de simulação mais viável em cada caso.

## 6.1 SIMULAÇÃO DE CURTO PRAZO

Definidas as máximas vazões captáveis dos reservatórios Jucazinho e Prata, bem como as limitações de transporte de água dos sistemas adutores, o SSD realizou a alocação de água

de cada fonte hídrica para cada centro de consumo. O problema de alocação é composto por 72 variáveis de decisão, que definem o funcionamento do sistema integrado de abastecimento composto por 18 centros de consumo e 5 fontes hídricas (NC = 18, NF = 5). O processo de otimização considerou a operação em 40% do tempo com tarifas de energia fora de ponta do setor elétrico, sendo executadas as simulações para cada um dos 5 cenários de armazenamento inicial dos reservatórios e contemplando os horizontes de planejamento 2014 e 2037. Nessa análise, a adoção de cenários e de horizontes de planejamento distintos busca investigar a interferência de condições externas na alocação de vazões das fontes.

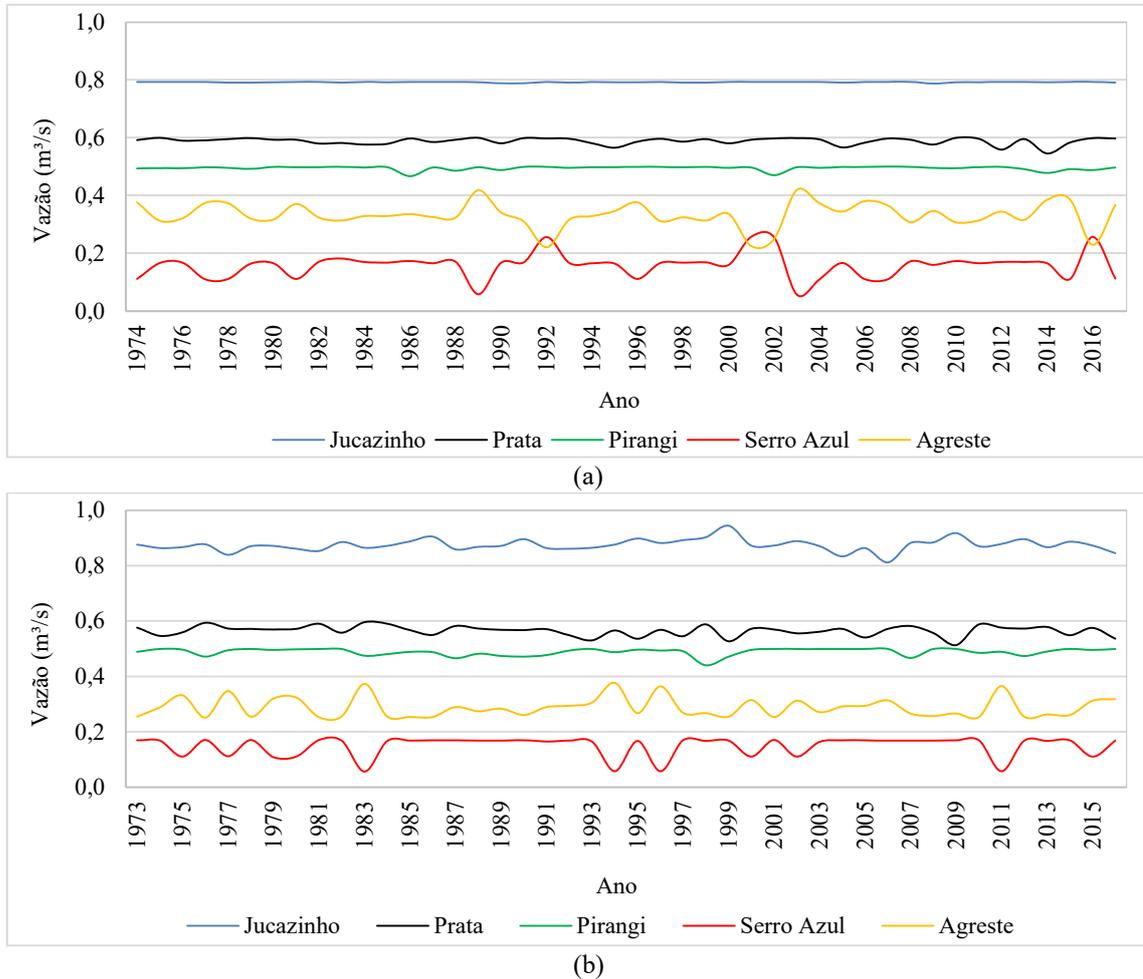
Na simulação de curto prazo, é obtido um conjunto de soluções para cada mês do ano a depender do ano de análise da série histórica. A variação das soluções propostas para um mesmo mês entre si reflete as diferenças das séries hidrometeorológicas ao longo dos anos, seja por mudanças climáticas e intensificação das atividades humanas ou fenômenos naturais. No Gráfico 6, é mostrada a variação da alocação de vazões das fontes hídricas ao longo dos anos para os meses de fevereiro e de junho no cenário 2, considerando o horizonte de planejamento 2014. Percebe-se que, em ambos os meses, a demanda dos municípios é majoritariamente abastecida pelo reservatório Jucazinho, seguido do reservatório Prata.

Convém salientar que o mês de fevereiro faz parte do período de estiagem, enquanto junho é considerado um mês chuvoso, sendo selecionados como meses representativos dos períodos seco e úmido. O cenário 2, com percentual inicial de armazenamento igual a 15% para o reservatório Jucazinho e 50% para o reservatório Prata, apresentou as maiores variações de alocação de vazões entre os meses. O reservatório Jucazinho fornece para o sistema em fevereiro uma vazão constante de 0,80 m<sup>3</sup>/s, já em junho as vazões são superiores em todos os anos, excedendo 0,90 m<sup>3</sup>/s nos anos de 1986, 1999 e 2009 da série histórica. Por isso, são necessárias maiores vazões das demais fontes para suprimento da demanda total em fevereiro do que em junho.

Devido à limitação de vazão imposta pela capacidade de transporte do sistema adutor do Prata (1 m<sup>3</sup>/s), o conjunto de vazões máximas captáveis fica aquém da capacidade de fornecimento do reservatório. Isso explica a baixa influência dos períodos de estiagem na distribuição de vazões no reservatório Prata, que parece ser mais afetada pelas oscilações de abastecimento do reservatório Jucazinho do que por quaisquer condições críticas de abastecimento na fonte. É possível perceber que a vazão fornecida pela Adutora do Pirangi oscila em torno do máximo aproveitamento de sua capacidade de transporte, que é igual a 0,5 m<sup>3</sup>/s, e que a distribuição de vazões da Adutora do Agreste afeta diretamente as vazões alocadas

pela Adutora de Serro Azul, visto que picos de vazões da Adutora do Agreste geram baixas de vazão da Adutora de Serro Azul e vice-versa.

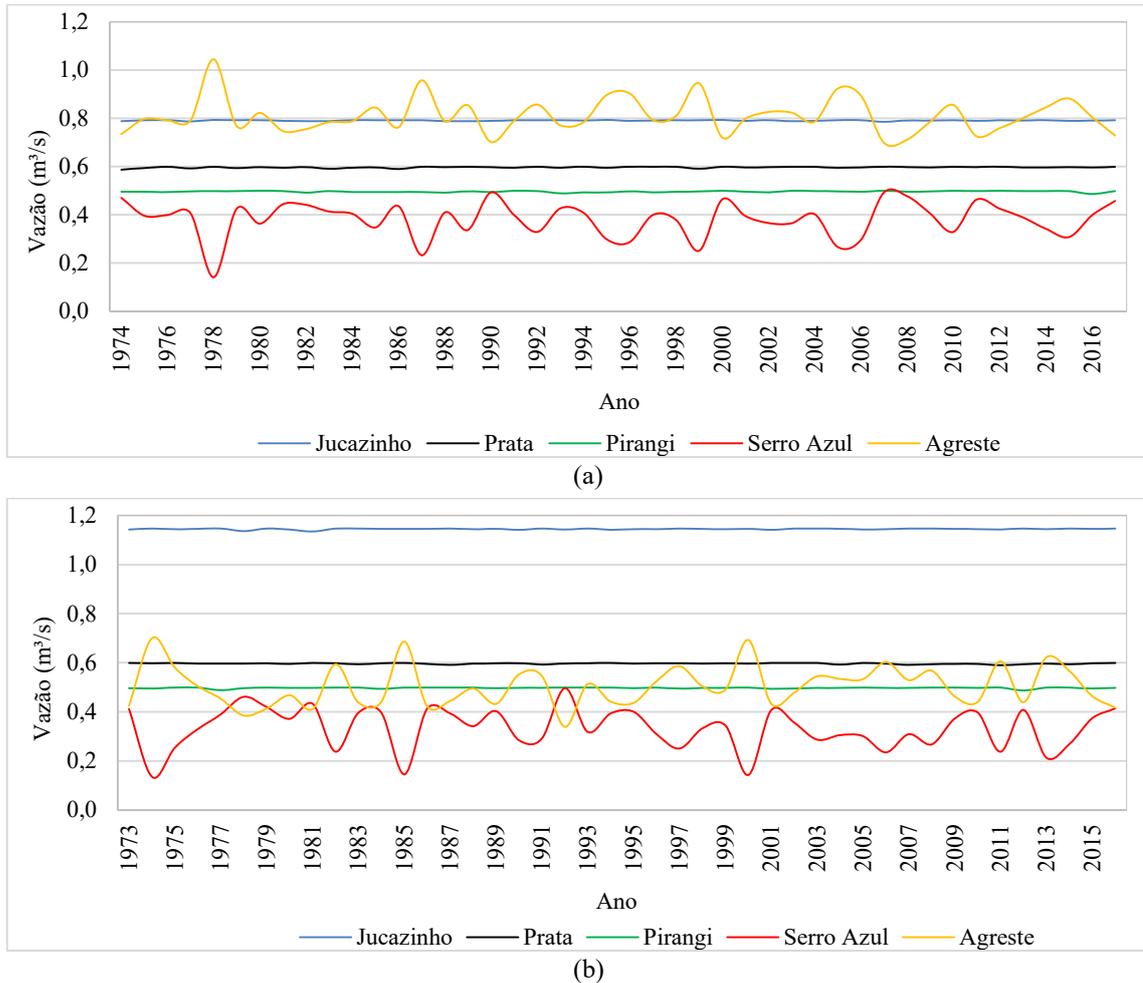
Gráfico 6 - Variação da alocação de vazões ao longo dos anos para o cenário 2 no horizonte de planejamento 2014 para os meses de fevereiro (a) e junho (b).



Fonte: Autora (2021).

Partindo da mesma análise, é ilustrada no Gráfico 7 a distribuição de vazões para os mesmos meses e cenário no horizonte de planejamento 2037. O horizonte de planejamento de 2037 aumentou consideravelmente as influências dos meses na alocação de vazões. O aumento de 30% na demanda total do sistema, associado ao baixo percentual de armazenamento do reservatório Jucazinho corroborou para um aporte significativo da Adutora do Agreste, especialmente em fevereiro, que é um mês de estiagem. Essa escolha do processo de otimização também se deve aos elevados custos de energia cobrados para operação contínua dos sistemas, que, em dados cenários, são superiores aos custos por m³ e fixos por demanda contratada da Adutora do Agreste.

Gráfico 7 - Variação da alocação de vazões ao longo dos anos para o cenário 2 no horizonte de planejamento 2037 para os meses de fevereiro (a) e junho (b).



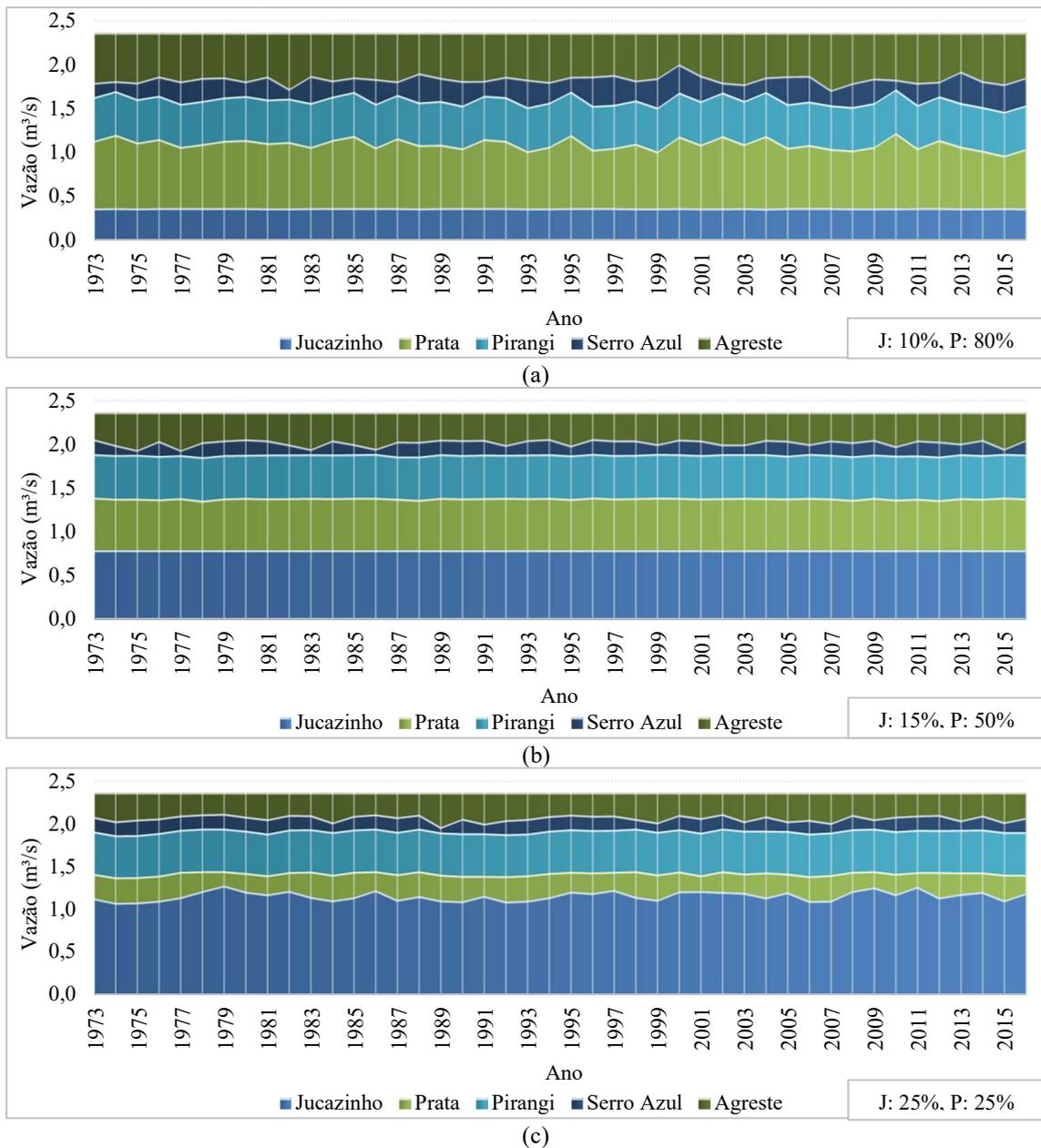
Fonte: Autora (2021).

Em fevereiro, as vazões da Adutora de Pirangi e dos reservatórios Jucazinho e Prata permaneceram iguais às do horizonte de planejamento 2014, levando as Adutoras do Agreste e de Serro Azul suprirem o excedente da demanda. As vazões alocadas da Adutora do Agreste em fevereiro são superiores às do reservatório Jucazinho em 23 anos da série histórica, o que destaca a importância da fonte, especialmente em períodos de estiagem e baixa acumulação no reservatório. Em junho, por sua vez, a Adutora do Agreste é a terceira fonte mais utilizada em quase 50% do tempo, reflexo do aumento da vazão captada do reservatório Jucazinho. Em ambos os meses e horizontes de planejamento, as Adutoras do Agreste e de Serro Azul mantêm o comportamento inversamente proporcional.

A interferência dos cenários na alocação de vazões do sistema pode ser vista no Gráfico 8. Para isso, foi selecionado o mês de outubro, de forma a complementar a análise dos meses fevereiro e junho, estabelecendo intervalos temporais iguais entre os meses discutidos. O cenário 1 tem percentual inicial de acumulação do reservatório Jucazinho igual a 10% e 80%

para o reservatório Prata. A baixa disponibilidade de captação do reservatório Jucazinho torna o reservatório Prata a fonte mais utilizada do sistema neste cenário, com as vazões oscilando entre 0,6 e 0,9 m<sup>3</sup>/s no horizonte de planejamento 2014. Com demanda total dos centros de consumo de 2,4 m<sup>3</sup>/s, a Adutora do Agreste é a segunda fonte mais utilizada na maior parte do tempo, seguida da Adutora do Pirangi, que opera com sua capacidade máxima de transporte. O reservatório Jucazinho fornece uma vazão constante de 0,37 m<sup>3</sup>/s que, apesar de baixa, ainda é superior ao aporte da Adutora de Serro Azul.

Gráfico 8 - Variação da alocação de vazões ao longo dos anos para o mês de outubro no horizonte de planejamento 2014 para os cenários 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



Fonte: Autora (2021).

No cenário 2, o maior percentual de armazenamento do reservatório Jucazinho reflete diretamente no aumento da vazão fornecida, que assume o valor constante de  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$  em todos os anos da análise. Por consequência, as vazões das demais fontes diminuem, levando o reservatório Prata a oscilar em torno de  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , tornando-o a segunda fonte mais utilizada. No cenário 3, com percentual inicial de armazenamento igual a 25% para ambos os reservatórios, o reservatório Jucazinho é responsável por abastecer quase metade de toda a demanda requerida. De maneira geral, pode-se concluir que, independentemente do cenário, a simulação converge para soluções cujo aproveitamento da Adutora do Pirangi é máximo e o aporte da Adutora de Serro Azul é baixo, o que a destaca como a fonte menos viável do sistema. As vazões dos reservatórios, como esperado, são alteradas significativamente conforme o cenário analisado, podendo ser reduzidas em cenários mais críticos a um quarto da vazão máxima registrada.

No Gráfico 9, são mostradas as variações mensais das vazões alocadas das fontes hídricas nos horizontes de planejamento para o cenário 2, cujas variações foram as maiores registradas, e para o cenário 5, com percentual inicial de armazenamento igual a 50% para ambos os reservatórios. No cenário 2, há aumento da vazão fornecida pelo reservatório Jucazinho no período de maio a agosto, influenciando na vazão das demais fontes, especialmente da Adutora do Agreste. As oscilações podem ser vistas em ambos os horizontes de planejamento, mas em 2037 são mais acentuadas, tendo em vista o aumento da demanda total dos centros de consumo para  $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Apesar das alocações de vazões distintas a depender dos percentuais iniciais de armazenamento dos reservatórios, o cenário 5 apresentou baixas oscilações mensais assim como a maioria dos cenários. O cenário 2, por sua vez, apresentou um comportamento atípico se comparado aos demais. Além disso, os horizontes de planejamento não exercem quaisquer influências nesses casos, o que destaca a interferência do armazenamento inicial dos reservatórios no impacto das séries hidrometeorológicas na alocação de vazões do sistema.

Através da avaliação dos resultados apresentados na Tabela 10, é possível tirar conclusões importantes acerca do efeito dos cenários nas vazões médias. Para ambos os horizontes de planejamento, as vazões do reservatório Prata aumentaram à medida que o percentual inicial de armazenamento do reservatório também aumentou. Isso não aconteceu no reservatório Jucazinho, que registrou vazões máximas no cenário 3 com apenas 25% da capacidade total no início do balanço hídrico, o que é justificado por ser o cenário no qual o reservatório Prata apresentou paralelamente a situação mais crítica analisada. Globalmente, essa conclusão implica que, apesar de condições de armazenamentos boas, aproveitar o máximo

possível da fonte não é a resposta para custos operacionais mais baixos, o que reforça a complexidade da tomada de decisão e a necessidade do uso de um sistema de suporte à decisão.

Gráfico 9 - Vazões médias alocadas ao longo dos meses para os cenários 2 e 5, respectivamente, nos horizontes de planejamento 2014 (a, c) e 2037 (b, d).

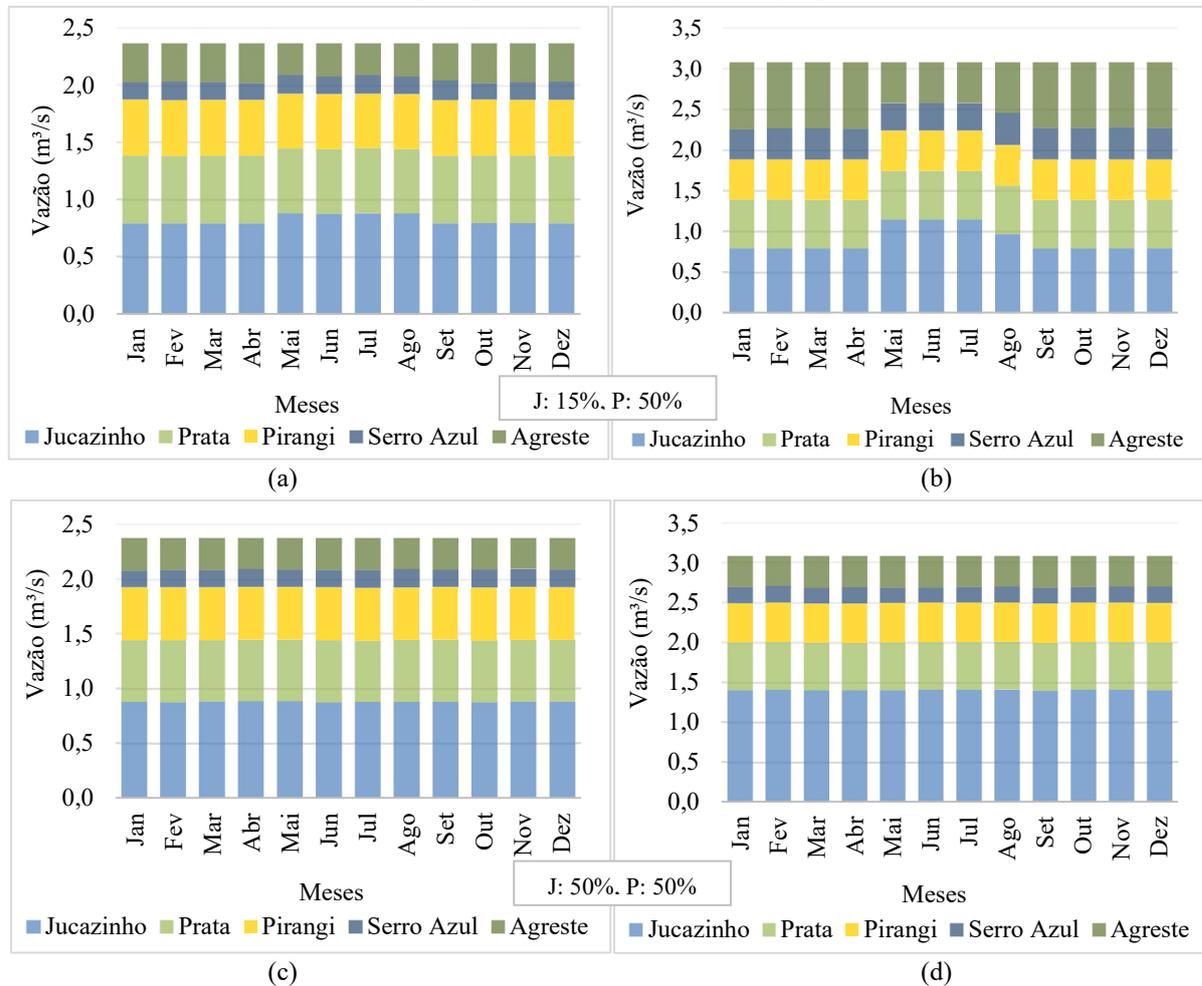


Tabela 10 - Vazões médias por fonte hídrica nos horizontes de planejamento e cenários analisados.

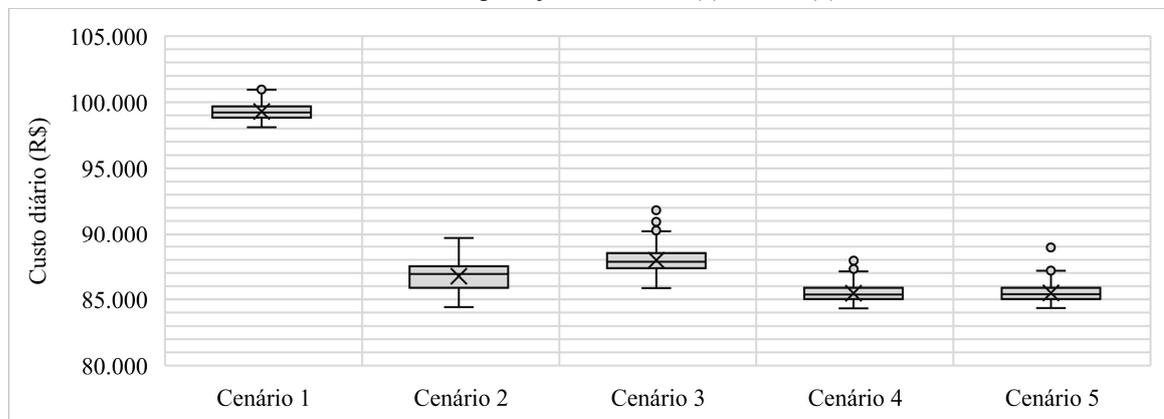
Mês	Vazões médias (m³/s)									
	Jucazinho		Prata		Pirangi		Serro Azul		Adutora do Agreste	
	2014	2037	2014	2037	2014	2037	2014	2037	2014	2037
Cenário 1	0,367	0,366	0,738	0,983	0,497	0,497	0,237	0,388	0,528	0,844
Cenário 2	0,821	0,894	0,582	0,597	0,493	0,497	0,153	0,372	0,318	0,718
Cenário 3	1,169	1,656	0,253	0,292	0,497	0,498	0,152	0,204	0,297	0,427
Cenário 4	0,876	1,272	0,569	0,738	0,485	0,495	0,157	0,200	0,280	0,372
Cenário 5	0,878	1,403	0,564	0,598	0,488	0,497	0,155	0,194	0,282	0,386

Fonte: Autora (2021).

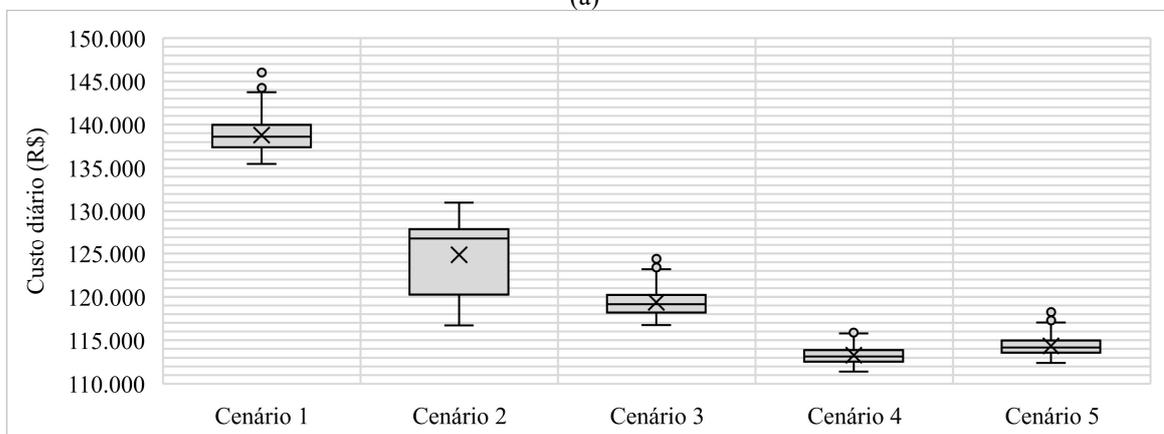
Como já comentado, a Adutora do Pirangi mostrou-se uma fonte viável em todos os cenários e horizontes de planejamento. Enquanto isso, a Adutora de Serro Azul registrou as piores médias, ampliando o aporte apenas nos casos em que o reservatório Jucazinho encontrava-se em condição de seca extrema. Nesses casos específicos, a Adutora do Agreste também contribuiu mais para abastecimento da demanda, registrando as maiores vazões quando o reservatório Jucazinho contava com 10% de capacidade máxima.

Os custos para operação do sistema variam conforme a distribuição das vazões alocadas das fontes. No Gráfico 10, é mostrada a variação dos custos operacionais do sistema nos cenários analisados. Para o horizonte de planejamento 2014, o custo operacional médio varia entre R\$85.477,77 e R\$ 99.303,17 sendo, respectivamente, as médias relativas aos cenários 4 e 1. O desvio entre os custos oscila entre R\$ 610,80 e R\$ 1.084,78, com as maiores variações pertencentes ao cenário 2. Para o horizonte de planejamento 2037, os custos variam entre R\$ 113.273,39 e R\$ 138.792,44, com o desvio padrão mínimo de R\$ 984,40 correspondente ao cenário 4 e máximo de R\$ 4.156,92 do cenário 2.

Gráfico 10 – Variação dos custos operacionais para a simulação de curto prazo nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2021).

A baixa disponibilidade hídrica do reservatório Jucazinho dos cenários 1 e 2, elevando as vazões das demais fontes para suprimento da demanda, leva a soluções com custos diários mais altos. Os cenários 4 e 5 esboçam os melhores estados operacionais no sistema, com custos diários mais baixos e próximos entre si. No cenário 4, o reservatório Jucazinho opera em regime de seca, enquanto no cenário 5, o reservatório opera apenas com leves restrições de demanda.

Apesar disso, os custos do cenário 4 são menores, o que destaca que, a partir de certo ponto, aumentar a disponibilidade hídrica, especialmente do reservatório Jucazinho, não surte efeito na redução dos custos operacionais. Esse comportamento pode ser explicado pela alta variação de vazões do reservatório e, dessa forma, maiores aproveitamentos da fonte levam o sistema a operar em horário de ponta, aumentando a tarifa de energia cobrada. É possível concluir que, apesar de existirem fontes mais viáveis e, por isso, mais exploradas, o processo de otimização leva a alocação de vazões equilibradas, sem grandes picos ou variações.

O cerne da simulação de curto prazo é a avaliação mensal do problema de alocação. Sob esse contexto, o custo operacional ao longo dos meses do ano reflete a influência das séries hidrometeorológicas e períodos de chuva e estiagem na análise. Na Tabela 11, é possível avaliar o impacto dos cenários, meses e horizontes de planejamento nos custos operacionais. Como já discutido, o cenário 2 apresentou as maiores variações mensais na alocação de vazões e, conseqüentemente, nos custos operacionais. Nos demais cenários, a variação entre os meses foi baixa e sem relação significativa com os períodos chuvosos e de estiagem.

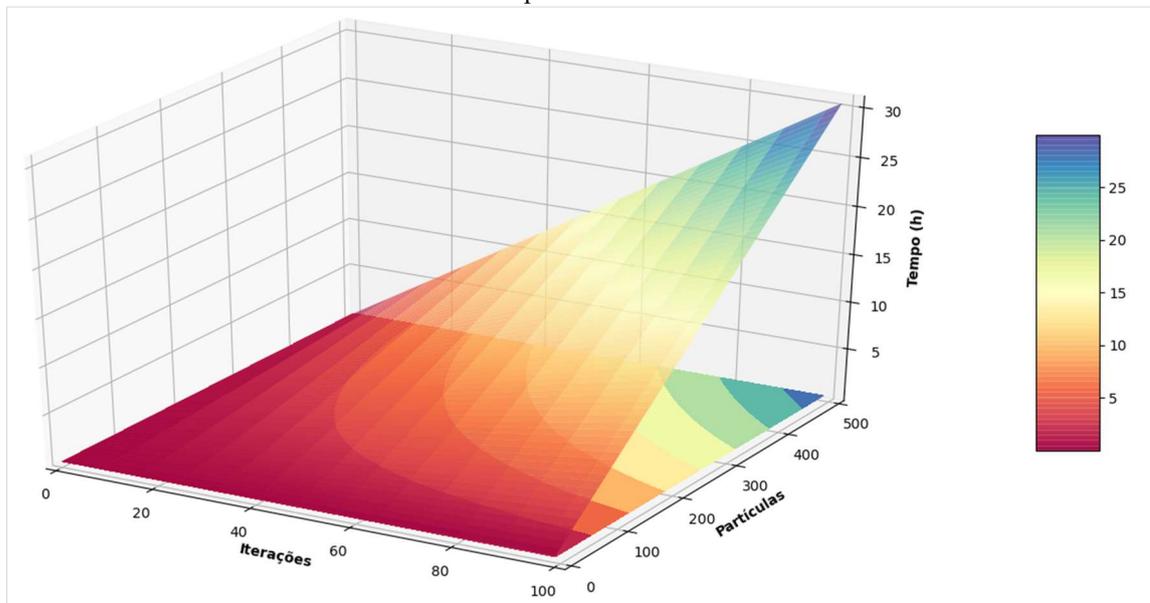
Tabela 11 - Custos operacionais médios para a simulação de curto prazo nos cenários e horizontes de planejamento analisados ao longo dos meses.

Mês	Custo diário médio (10 <sup>3</sup> R\$)									
	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5	
	2014	2037	2014	2037	2014	2037	2014	2037	2014	2037
Janeiro	99,38	138,55	87,36	127,96	87,96	119,36	85,47	113,37	85,60	114,23
Fevereiro	99,38	138,71	87,53	127,58	87,69	119,15	85,55	113,80	85,48	114,37
Março	99,21	138,72	87,27	127,71	88,19	119,09	85,34	113,43	85,58	114,57
Abril	99,29	138,79	87,44	127,63	87,87	119,58	85,44	113,56	85,38	114,53
Mai	99,46	139,54	85,44	118,29	88,01	119,68	85,48	112,83	85,43	114,47
Junho	99,43	138,68	85,52	118,43	88,01	118,94	85,65	112,96	85,53	114,36
Julho	99,09	138,37	85,48	118,40	87,94	119,42	85,46	112,85	85,59	114,16
Agosto	99,34	138,74	85,66	122,09	88,05	119,27	85,46	112,90	85,61	114,26
Setembro	99,27	138,87	87,30	127,69	88,18	119,13	85,52	113,12	85,41	114,54
Outubro	99,35	139,49	87,33	127,59	87,97	119,58	85,55	113,31	85,52	114,29
Novembro	99,19	138,42	87,37	127,60	87,98	119,57	85,51	113,46	85,38	114,26
Dezembro	99,25	138,64	87,40	127,40	87,88	119,75	85,31	113,67	85,46	114,25

Fonte: Autora (2021).

Apesar dos métodos probabilísticos, como o PSO, serem mais eficientes que os determinísticos, o tempo de processamento pode ser uma grande desvantagem ao lidar com problemas complexos. O tempo está diretamente ligado ao nível de incerteza de que a solução obtida se aproxima do ótimo global. No PSO, os principais parâmetros responsáveis pela definição da certeza da solução são as quantidades de partículas e de iterações. Os resultados dessa seção foram obtidos com 20 iterações e 500 partículas, totalizando 6 h e 11 min de processamento para cada simulação. No Gráfico 11, é mostrada a superfície que descreve o tempo de processamento em função das quantidades de iterações e partículas para a simulação de curto prazo.

Gráfico 11 - Tempo de processamento para simulação de curto prazo em função da quantidade de iterações e partículas.



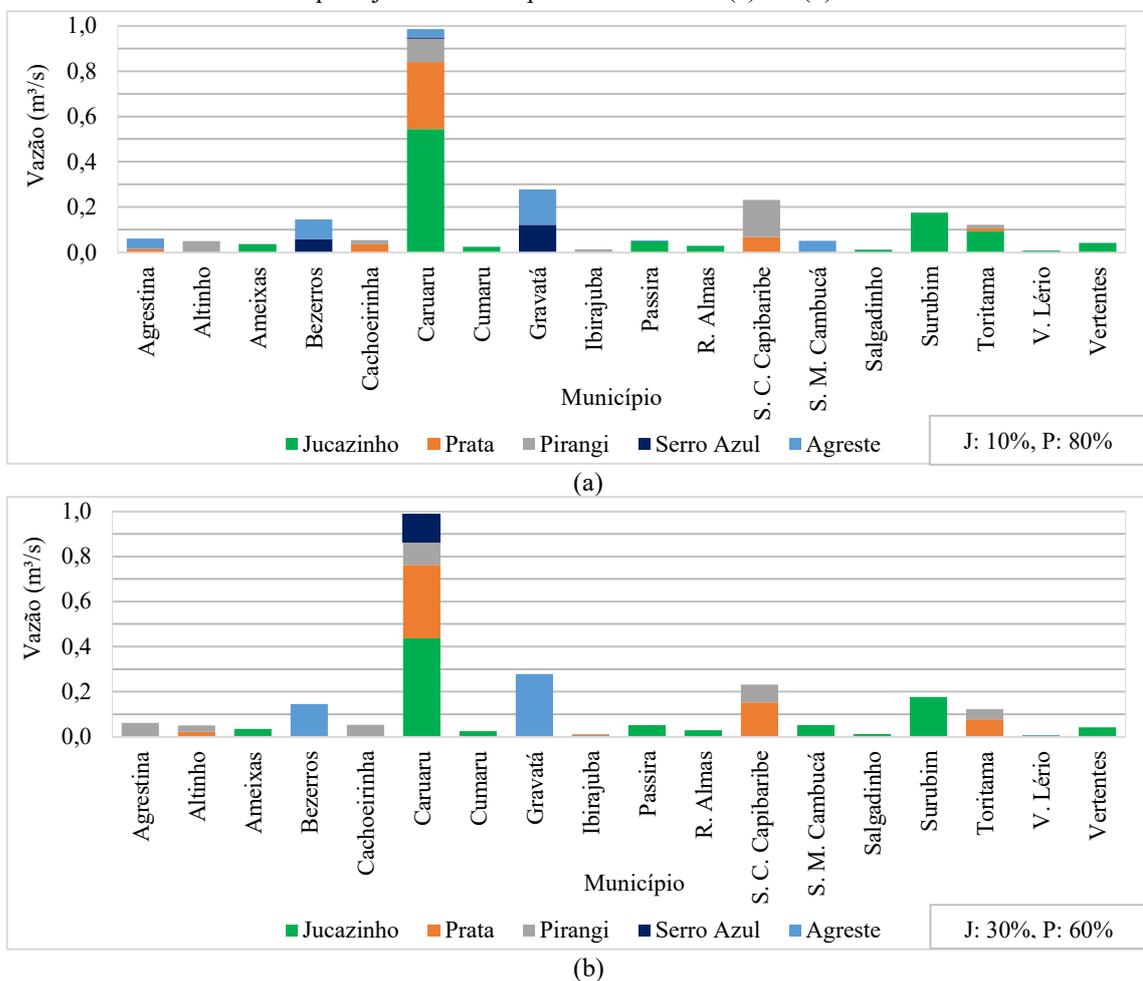
Fonte: Autora (2021).

## 6.2 SIMULAÇÃO DE LONGO PRAZO

A simulação de longo prazo gera uma solução única de alocação de água de cada fonte hídrica para cada centro de consumo, totalizando 72 variáveis de decisão. A solução ótima deve ser capaz de operar com custos mínimos sob critérios técnicos e hídricos, além de apresentar desempenho satisfatório para toda a série histórica analisada. Semelhantemente à simulação de curto prazo, foram avaliados dois horizontes de planejamento, com demandas dos centros de consumo para o ano-base de 2014 e projeções para 2037. Além disso, o sistema operou em 40% do tempo fora do horário de ponta e foram executadas as simulações para cada um dos cinco cenários de armazenamento inicial dos reservatórios.

É natural que a análise de sensibilidade proporcione alterações significativas nas simulações de curto prazo e menor influência nos resultados obtidos na simulação de longo prazo. Apesar disso, a definição de cenários interfere nos resultados encontrados, principalmente nos anos iniciais da série histórica. No Gráfico 12, foram selecionados os cenários com resultados mais contrastantes para o horizonte de planejamento 2014, sendo eles: cenário 1 e 4 com percentual inicial para o reservatório Jucazinho, respectivamente, de 10% e 30%, e para o reservatório Prata, 80% e 60%.

Gráfico 12 - Alocação média de vazões das fontes hídricas para os centros de consumo no horizonte de planejamento 2014 para os cenários 1 (a) e 4 (b).



Fonte: Autora (2021).

Os municípios Agrestina, Caruaru, Bezerros, Gravatá, Santa Cruz do Cambucá, Toritama e Vertente do Lério tiveram as principais mudanças nas fontes de abastecimento. No cenário 4, Bezerros, Gravatá e Vertente do Lério passam a ser totalmente abastecidos pela Adutora do Agreste, Agrestina pela Adutora do Pirangi e Santa Maria do Cambucá é abastecida pelo reservatório Jucazinho. O município Toritama passa a receber vazão do reservatório Prata

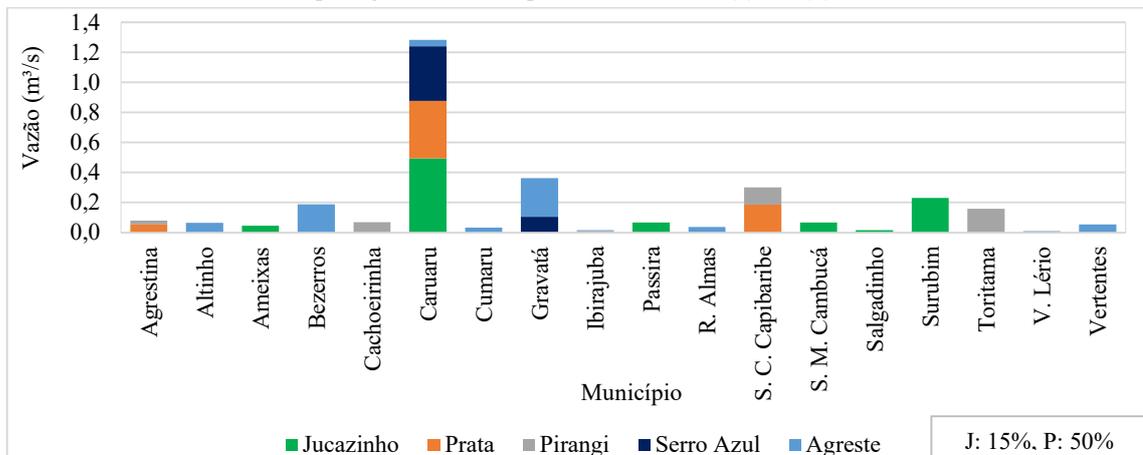
e da Adutora de Pirangi, diferente do que acontece no cenário 1, em que 75% da demanda era abastecida pelo reservatório Jucazinho. Caruaru, cuja demanda para 2014 foi estimada em 986 L/s, tem redução de 19% na dependência do reservatório Jucazinho no cenário 4, em contrapartida, o aporte da Adutora de Serro azul chega a 12% da demanda requerida.

É importante destacar que, apesar do reservatório de Jucazinho operar em seca severa nos anos iniciais do cenário 1, a fonte abastece o sistema com uma vazão média de 1,01 m<sup>3</sup>/s, reduzindo em 15% no cenário 4. Por isso, no cenário 4, a vazão do reservatório Prata chega a 0,58 m<sup>3</sup>/s. Isso permite concluir que, apesar dos cenários influenciarem nos resultados encontrados e levarem a baixas captações nos anos iniciais, a influência é atenuada ao longo dos demais anos da série histórica, permitindo em alguns casos captações até maiores do que em cenários iniciais mais favoráveis.

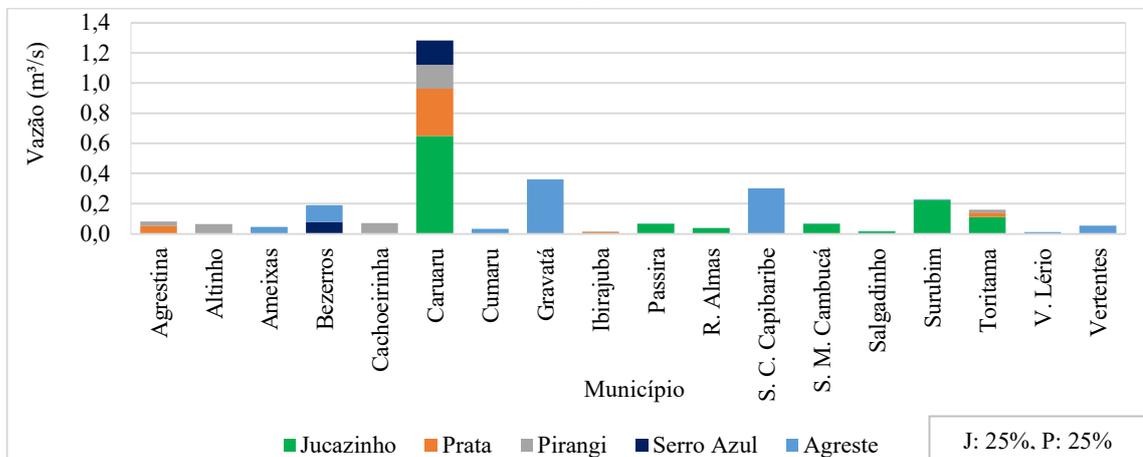
No Gráfico 13, é mostrada a alocação média para o horizonte de planejamento 2037 dos cenários 2 e 3, que registraram maiores diferenças entre si. Dentre as diferenças, podem-se destacar que, no cenário 3, os municípios Gravatá e Santa cruz do Capibaribe e o distrito Ameixas passaram a ser totalmente abastecidos pela Adutora do Agreste, e os municípios Altinho, Bezerros e Riacho das Almas reduziram sua dependência da Adutora, passando a ser abastecidos também por outras fontes. O município Toritama, que era abastecido apenas pela Adutora de Pirangi no cenário 2, passou a ser abastecido majoritariamente pelo reservatório Jucazinho no cenário 3.

Semelhantemente ao horizonte de planejamento 2014, o reservatório Jucazinho é responsável pelo abastecimento de mais da metade da demanda de Caruaru no cenário 3, o que contribuiu para uma vazão média total da fonte de 1,17 m<sup>3</sup>/s, 27% superior ao total do cenário 2. A adutora do Agreste que, no cenário 2, fornecia 0,69 m<sup>3</sup>/s passa a abastecer o sistema com 0,92 m<sup>3</sup>/s no cenário 3, o que implica na redução do aporte das demais fontes. Por isso, o reservatório Prata passa de 0,62 m<sup>3</sup>/s para 0,41 m<sup>3</sup>/s e a adutora de Pirangi de 0,47 m<sup>3</sup>/s para 0,23 m<sup>3</sup>/s.

Gráfico 13 - Alocação média de vazões das fontes hídricas para os centros de consumo no horizonte de planejamento 2037 para os cenários 2 (a) e 3 (b).



(a)



(b)

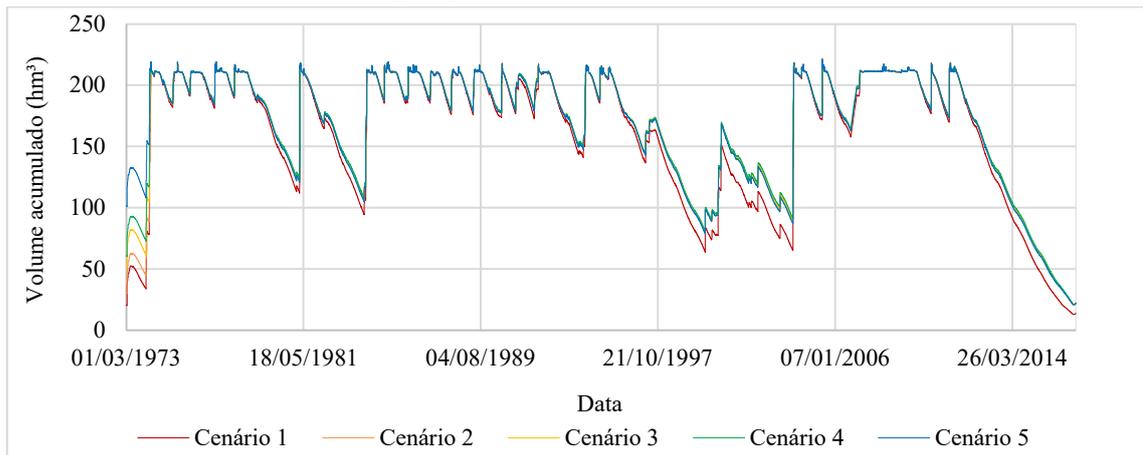
Fonte: Autora (2021).

Para o alcance do objetivo geral de alocação de vazões foram realizados os balanços hídricos para os reservatórios Jucazinho e Prata, contendo dados referentes aos volumes iniciais e finais de cada fonte e considerando as retiradas diárias propostas pelo SSD. Como já discutido, cabe ao SSD definir como as vazões são alocadas e, no caso dos reservatórios, a análise é regida por regras de zoneamento operacional e pelas máximas vazões captáveis descritas pelas curvas-guia. A utilização de zoneamento operacional permitiu captar as máximas vazões viáveis sob diversos cenários de iniciais de acumulação com as demandas para o ano de 2014 e para a projeção de 2037.

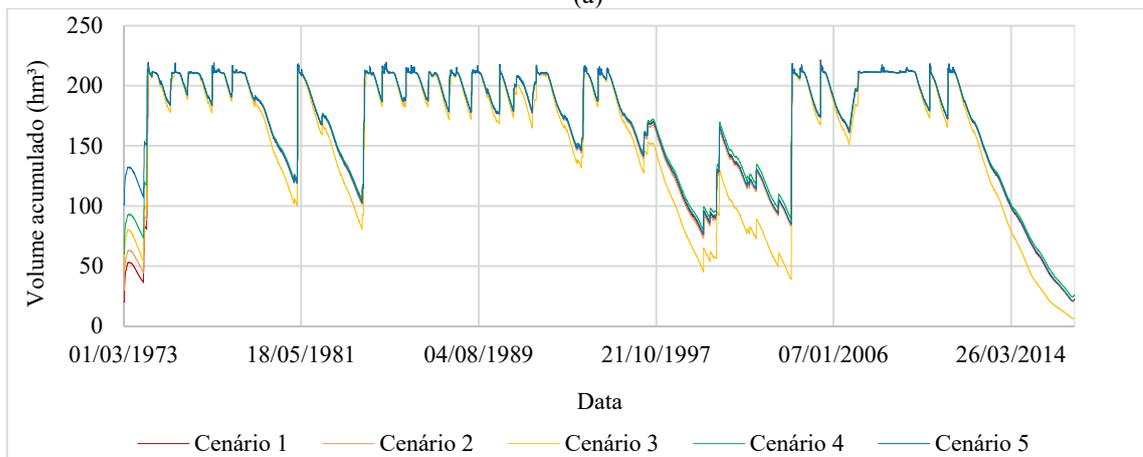
O SSD tende a adotar uma distribuição com baixas variações ao longo da série histórica, apesar das altas oscilações de disponibilidade do reservatório Jucazinho, que pode oferecer uma vazão captável de até 3,52 m³/s em condições normais. Não foi viável para operação do sistema integrado aproveitar vazões muito altas, visto que o SSD de simulação de longo prazo busca uma solução única com correções diárias. Dessa forma, maiores dependências de sistemas com

alta variabilidade de vazões captáveis geram instabilidades de provisão em períodos de seca nos reservatórios, principalmente para Jucazinho. Essa condição de captação sem grandes excessos reflete no volume de água armazenado ao longo da série histórica, como pode ser visto no Gráfico 14.

Gráfico 14 - Volume armazenado no reservatório Jucazinho nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2021).

Apesar dos cenários de armazenamento inicial distintos, que variam entre 10% e 50%, em menos de dois anos o reservatório Jucazinho parece recuperar-se das condições iniciais adversas impostas, levando a uma distribuição similar de volumes nos anos seguintes. Os resultados permitem observar que a operação do reservatório Jucazinho reduz sistematicamente o volume de armazenamento acumulado apenas no final da série histórica. No horizonte de planejamento 2014, o cenário 1 atinge o volume mínimo de 13,8 hm<sup>3</sup> e, na projeção de 2037, o cenário 3 registra 6,6 hm<sup>3</sup>. Essa condição é aceitável devido à garantia de

abastecimento de água dada pela Adutora do Agreste. Nos demais cenários, o volume mais crítico observado está acima de 20 hm<sup>3</sup>.

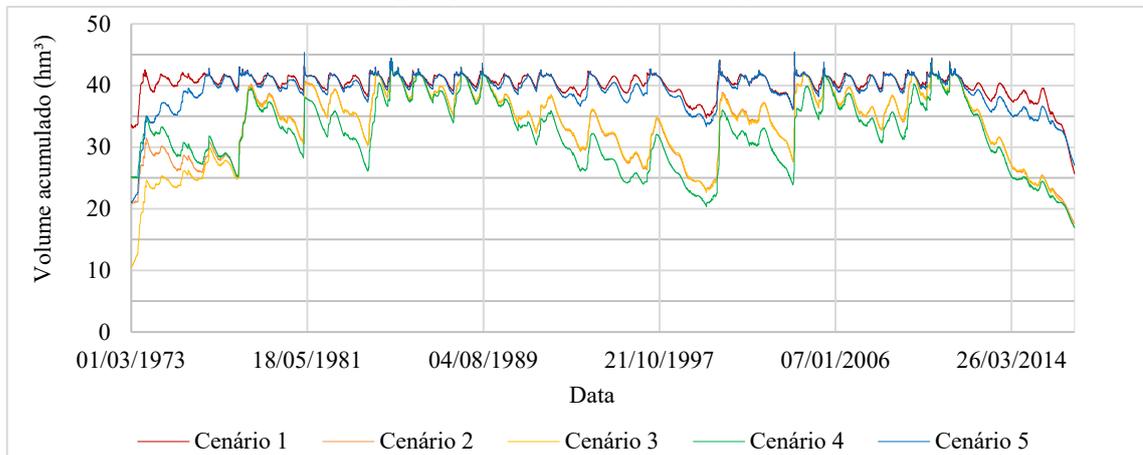
Em todos os cenários e horizontes de planejamento analisados, o reservatório Jucazinho opera em condições normais em pelo menos 70% da série histórica, destacando o quanto a utilização da fonte está aquém de sua capacidade, o que pode ser justificado pelas tarifas de energia praticadas na região e pelas condições infraestruturais que elevam a perda de carga do sistema. Para o ano-base de 2014, o reservatório passa cinco meses em condição de pré-colapso no cenário 1 e, para 2037, 1 ano e 4 meses no cenário 3. Nos demais casos, a condição de armazenamento mais crítica é marcada por menos de 2 anos em seca extrema.

No reservatório Prata, a captação é ainda mais baixa, levando o reservatório a operar com mais de 20 hm<sup>3</sup> em praticamente toda a série histórica. A limitação neste caso não é apenas relativa aos custos operacionais, mas também à capacidade de transporte restrita a 1 m<sup>3</sup>/s, que impede a máxima exploração do reservatório. Diferente do que acontece com o reservatório Jucazinho, os cenários exercem maior influência no volume acumulado, como pode ser visto no Gráfico 15. Para o horizonte de planejamento 2014, os cenários 2 e 4 registram um breve período de condição de alerta e o cenário 3, seca severa. Ainda assim, em mais 85% do tempo é possível captar do reservatório a máxima vazão transportada, 1 m<sup>3</sup>/s. Para o horizonte de planejamento 2037, o cenário 2 é o mais crítico, operando em 23% do tempo em condição de alerta, 35% com restrição de demanda e 42% em condições normais de abastecimento. Nos demais, o reservatório conta com 60% de armazenamento em praticamente toda a série histórica.

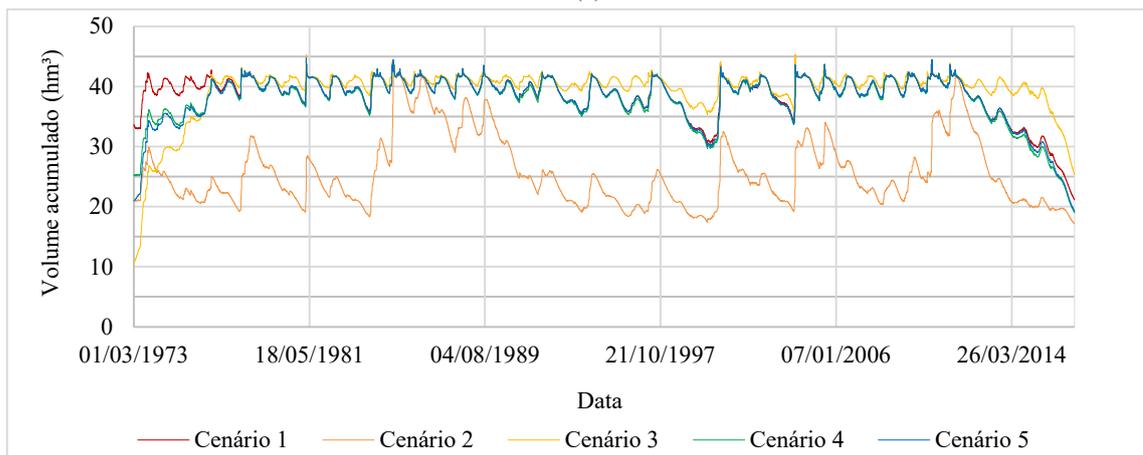
Os volumes armazenados nos reservatórios influenciam na máxima vazão que pode ser definida pelo SSD para suprimento da demanda e, conseqüentemente, nos custos operacionais do sistema. Por isso, os custos variam conforme o cenário inicial de acumulação dos reservatórios, bem como o horizonte de planejamento analisado. Analisando a variação dos custos operacionais para a simulação de longo prazo nos cenários (Gráfico 16), pode-se perceber que os maiores custos diários registrados ocorrem nos anos iniciais e finais da série histórica, o que coincide com os períodos de menor acumulação de água nos reservatórios. Como a simulação de longo prazo busca uma solução única ajustada dia a dia, a redução da disponibilidade hídrica reduz proporcionalmente a vazão alocada dos reservatórios, exigindo maior aporte de fontes menos viáveis para garantir o suprimento da demanda. Apesar disso, o aumento da variável de decisão não parece compensar, visto que no panorama global aumentaria o aporte dos reservatórios em toda a série histórica, o que significaria captar vazões

mais altas em períodos de maior disponibilidade hídrica e assim aumentar perdas de cargas nos trechos e possivelmente utilizar tarifa em horário de ponta.

Gráfico 15 - Volume armazenado no reservatório Prata nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).



(a)

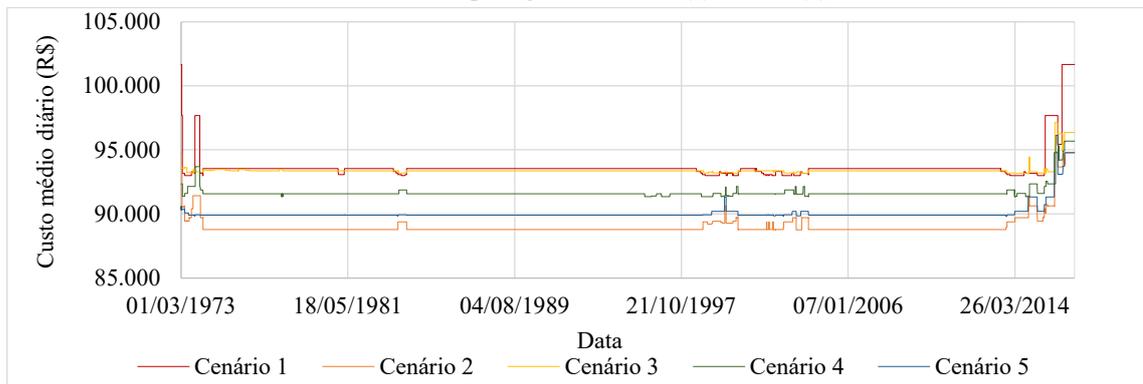


(b)

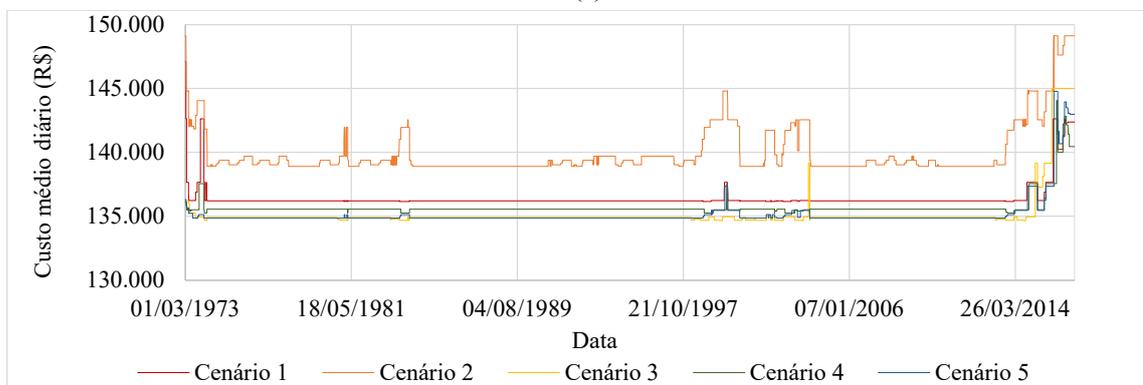
Fonte: Autora (2021).

No horizonte de planejamento 2014, os cenários 1 e 3 demandam maiores custos operacionais, variando entre R\$ 93.003,80 e R\$ 101.675,51, como pode ser visto em detalhes na Tabela 12. O cenário 2 resulta nos custos mais baixos da simulação, variando entre R\$ 88.765,14 e R\$ 94.853,72. No horizonte de planejamento 2037, a situação é diferente e o cenário 2 registra os custos operacionais mais altos, variando entre R\$ 138.929,15 e R\$ 149.129,33. Os demais cenários apresentam custos próximos entre si, na maior parte do tempo oscilando entre R\$ 135.000,00 e R\$ 136.000,00, atingindo valores superiores a R\$ 144.000,00 nos extremos da série histórica. Esse contraste de resultados entre os horizontes de planejamento destaca a influência do aumento da demanda na alocação de vazões e, conseqüentemente, nos custos operacionais.

Gráfico 16 - Variação dos custos operacionais para a simulação de longo prazo nos cenários analisados para os horizontes de planejamento 2014 (a) e 2037 (b).



(a)



(b)

Fonte: Autora (2021).

Tabela 12 - Mínimo, máximo e desvio padrão dos custos operacionais registrados nos cenários e horizontes de planejamento analisados.

Cenário	Horizonte de planejamento 2014			Horizonte de planejamento 2037		
	Mínimo (R\$)	Máximo (R\$)	Desvio padrão (R\$)	Mínimo (R\$)	Máximo (R\$)	Desvio padrão (R\$)
1	93.003,80	101.675,51	1.168,20	136.162,25	147.114,80	1.035,50
2	88.765,14	94.853,72	938,48	138.929,15	149.129,33	1.990,40
3	93.153,13	97.132,08	451,73	134.674,02	145.021,92	1.675,94
4	91.354,09	96.132,61	583,06	135.280,56	144.064,78	865,44
5	89.837,95	94.805,39	689,70	134.871,23	144.778,78	1.267,19

Fonte: Autora (2021).

Quanto aos custos médios, o cenário 1 tem o custo mais alto para o ano-base de 2014 com valor aproximado de R\$ 93.679,21 e o cenário 2, o mais baixo com valor de R\$ 89.078,78, conforme mostrado na Tabela 13. Apesar das variações, o reservatório Jucazinho e a Adutora do Agreste monopolizam os gastos, visto que Jucazinho fornece as maiores vazões e Adutora do Agreste, independente do consumo diário, tem um custo fixo a ser pago. Para a projeção de 2037, o maior custo médio registrado pertence ao cenário 2, cujo valor é R\$ 139.994,74, e o

menor é do cenário 5 com R\$ 135.176,39. Os maiores custos pertencem aos cenários mais críticos para o reservatório Jucazinho, cujos percentuais iniciais de armazenamento eram 10% e 15%, e em todos os cenários os gastos com a Adutora do Agreste são os maiores entre as fontes, variando entre R\$ 52.731,92 e R\$ 72.212,41.

Tabela 13 - Variação de vazões alocadas por fonte e custos operacionais para a simulação de longo prazo nos cenários analisados.

Cenário	Sistema	Horizonte de planejamento 2014				Horizonte de planejamento 2037			
		Vazões (m <sup>3</sup> /s)			Custo diário médio (R\$)	Vazões (m <sup>3</sup> /s)			Custo diário médio (R\$)
		Máximo	Mínimo	Médio		Máximo	Mínimo	Médio	
1	Jucazinho	1,05	0,36	1,01	28.443,86	0,95	0,31	0,92	23.284,86
	Prata	0,74	0,41	0,43	15.576,25	0,78	0,48	0,49	17.930,64
	Pirangi	0,49	0,35	0,36	12.334,29	0,48	0,30	0,31	9.790,28
	Serro Azul	0,26	0,18	0,18	10.007,80	0,38	0,24	0,25	13.231,22
	Agreste	0,51	0,36	0,38	27.317,02	1,16	1,10	1,10	72.212,41
	<b>Total (R\$)</b>				93.679,21				136.449,42
2	Jucazinho	0,90	0,58	0,88	22.952,40	1,00	0,55	0,92	23.919,28
	Prata	0,67	0,45	0,56	20.566,31	0,76	0,51	0,62	23.659,37
	Pirangi	0,50	0,34	0,35	11.168,25	0,41	0,36	0,38	13.649,42
	Serro Azul	0,38	0,27	0,28	14.771,10	0,49	0,44	0,47	26.034,72
	Agreste	0,32	0,29	0,30	19.620,72	1,11	0,65	0,69	52.731,92
	<b>Total (R\$)</b>				89.078,78				139.994,71
3	Jucazinho	0,94	0,59	0,87	23.762,06	1,25	0,37	1,17	32.469,14
	Prata	0,67	0,27	0,56	21.589,26	0,71	0,18	0,41	14.965,30
	Pirangi	0,50	0,34	0,35	11.848,63	0,50	0,33	0,34	11.456,45
	Serro Azul	0,29	0,21	0,22	11.511,04	0,36	0,22	0,23	12.495,64
	Agreste	0,43	0,36	0,36	24.724,95	1,14	0,92	0,92	63.838,77
	<b>Total (R\$)</b>				93.435,94				135.225,29
4	Jucazinho	0,92	0,61	0,86	22.932,20	0,91	0,46	0,88	22.223,58
	Prata	0,68	0,48	0,58	22.430,41	0,78	0,45	0,50	18.000,59
	Pirangi	0,50	0,36	0,37	12.048,87	0,49	0,31	0,32	10.888,76
	Serro Azul	0,23	0,12	0,12	6.592,81	0,39	0,29	0,30	15.760,53
	Agreste	0,43	0,43	0,43	27.686,73	1,07	1,07	1,07	68.843,11
	<b>Total (R\$)</b>				91.691,02				135.716,58
5	Jucazinho	0,96	0,57	0,89	24.038,46	1,02	0,49	0,91	23.100,45
	Prata	0,62	0,35	0,46	16.432,87	0,77	0,37	0,49	17.776,19
	Pirangi	0,48	0,39	0,40	13.060,61	0,50	0,44	0,44	17.322,78
	Serro Azul	0,37	0,30	0,30	16.036,15	0,40	0,20	0,21	11.305,27
	Agreste	0,32	0,32	0,32	20.490,96	1,02	1,02	1,02	65.671,70
	<b>Total (R\$)</b>				90.059,05				135.176,39

Fonte: Autora (2021).

Apesar da simulação de longo prazo encontrar uma solução única, facilitando assim a tomada de decisão, percebe-se que não foi possível minimizar os custos operacionais tanto quanto na simulação de curto prazo na maioria dos cenários. Desse modo, fica clara a necessidade econômica de adotar um modelo de alocação de vazões mensal, ampliando assim a importância das séries hidrometeorológicas e percentuais iniciais de acumulação dos reservatórios. Na simulação de longo prazo, dada a série histórica de 44 anos, o efeito dos

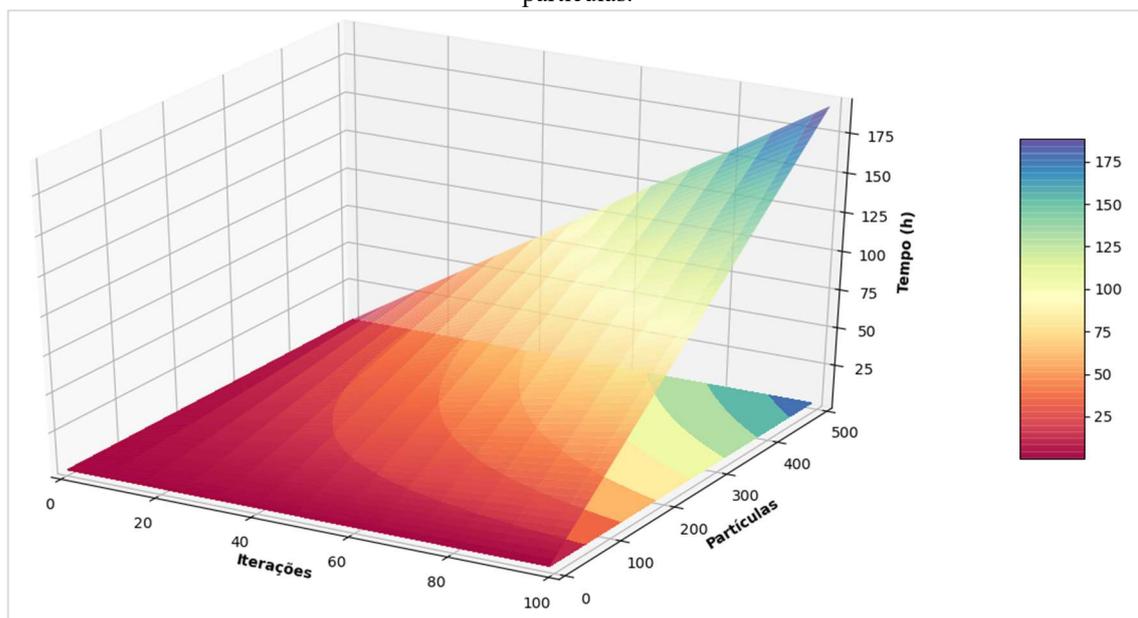
percentuais iniciais de acumulação é atenuado no processo, mas para análise de curto prazo é fator preponderante na obtenção da solução. A depender do valor desses parâmetros, há casos em que é mais segura e vantajosa a operação do sistema integrado de múltiplas fontes sob regras da simulação de longo prazo.

O cenário 1, em ambos os horizontes de planejamento, foi o único caso em que a simulação de longo prazo obteve menores custos operacionais do que a simulação de curto prazo. A simulação de longo prazo reduziu os custos operacionais médios em aproximadamente 6% para o horizonte de planejamento 2014 e em 2% para 2037. Nos demais cenários, especialmente para a projeção de 2037, os custos operacionais da simulação de curto prazo foram consideravelmente menores, chegando em alguns casos a ultrapassar R\$ 22.000,00 de diferença.

Comparando as vazões médias alocadas das fontes, percebe-se que a simulação de longo prazo permitiu uma maior captação dos reservatórios, mesmo em cenários de armazenamento desfavoráveis. Em contrapartida, as variações foram maiores, no cenário 1, por exemplo, a vazão do reservatório Jucazinho variou de 0,36 m<sup>3</sup>/s a 1,05 m<sup>3</sup>/s em 2014 e de 0,31 m<sup>3</sup>/s a 0,95 m<sup>3</sup>/s em 2037, reforçando a menor captação nos anos iniciais devido ao baixo percentual inicial de acumulação do reservatório e a maior captação à medida que o volume de acumulação chegava a melhores condições. Enquanto isso, na simulação de curto prazo para o mesmo cenário, as vazões foram de 0,37 m<sup>3</sup>/s nos dois horizontes de planejamento analisados. Nota-se que o aumento das demandas foi abastecido majoritariamente pela Adutora do Agreste, que chegou a triplicar no horizonte de planejamento 2037.

Os resultados dessa seção foram obtidos com 20 iterações e 200 partículas, totalizando 15 h e 35 min de processamento por simulação. No Gráfico 17, é mostrada a superfície que descreve o tempo de processamento em função das quantidades de iterações e partículas para a simulação de curto prazo. A simulação de longo prazo notoriamente exige maior esforço computacional e, conseqüentemente, maior tempo de processamento para obtenção da solução ótima. Isso ocorre devido aos processos de correções das vazões alocadas e obtenção de custos diários que exigem a manipulação de uma grande quantidade de dados e verificações, tornando assim o processo mais lento.

Gráfico 17 - Tempo de processamento para simulação de longo prazo em função da quantidade de iterações e partículas.



Fonte: Autora (2021).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A alocação eficiente de recursos hídricos, principalmente em condições de múltiplas fontes de abastecimento de água e escassez hídrica, é um desafio para os gestores das companhias de abastecimento. É notória a necessidade do desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão robustos capazes de oferecer subsídio para tomada de decisão. A definição de parâmetros que norteiem a operação eficiente de grandes sistemas produtores e adutores de água é indispensável para o Agreste pernambucano, cujo balanço hídrico desfavorável reforça a necessidade de um planejamento estratégico. O levantamento de informações hídricas, técnicas e econômicas mostrou-se uma etapa indispensável para a modelagem e otimização dos processos, permitindo ao sistema emular as características do estudo de caso e a garantia da obtenção de soluções aplicáveis e reais.

A proposta de operação dos reservatórios do Agreste pernambucano regida por meio de regras de zoneamento operacional resultou na definição de um conjunto de vazões captáveis capaz de garantir o máximo aproveitamento das fontes hídricas e o aumento da eficiência energética dos sistemas adutores. De maneira geral, o reservatório Jucazinho foi a fonte mais utilizada devido às maiores disponibilidades hídricas, mas os resultados apontam que a Adutora do Pirangi é uma fonte viável em ambos os cenários e horizontes de planejamento. A Adutora de Serro Azul apresentou o pior desempenho, abastecendo a demanda com menos da metade de sua capacidade de fornecimento na maior parte da série histórica, reflexo de suas maiores alturas manométricas e, conseqüentemente, maiores custos de bombeamento.

O método de inteligência coletiva PSO, adotado no SSD, gerou resultados consistentes a boas taxas de convergência. O tempo para processamento do volume de dados de entrada e cálculo de novos parâmetros foi fator decisivo, principalmente para simulação de longo prazo, que resultou em 15 h e 35 min de processamento, enquanto a simulação de curto prazo, apenas 6 h e 11 min. Além disso, foi possível notar a influência dos percentuais iniciais de acumulação dos reservatórios na obtenção da solução, de modo que os cenários mais críticos para o reservatório Jucazinho resultaram em custos maiores para operação do sistema e destacaram a necessidade do aporte da Adutora do Agreste para suprimento da demanda, visto que o sistema adutor do Prata tem capacidade limitada a 1 m<sup>3</sup>/s.

A interferência dos cenários de armazenamento inicial foi atenuada pela quantidade de anos analisados da série histórica na simulação de longo prazo, visto que em menos de dois anos os reservatórios recuperaram-se das condições iniciais adversas impostas em todos os cenários. Os resultados encontrados apontam a maior viabilidade econômica da simulação de

curto prazo, com reduções médias no custo operacional de 2,8% para o horizonte de planejamento de 2014 e 10,5% para 2037 se comparadas à simulação de longo prazo. Apesar disso, um dos cinco cenários analisados resultou em custos mais baixos para a simulação de longo prazo em ambos os horizontes de planejamento. Isso reforça que, a depender das condições externas, há casos em que é mais viável a simulação de longo prazo do sistema integrado de múltiplas fontes.

Para futuras pesquisas, recomenda-se investigar o comportamento do processo de otimização para mais cenários de armazenamento inicial dos reservatórios e outros horizontes de planejamento, bem como analisar a convergência e o tempo de processamento para métodos probabilísticos híbridos, que podem obter melhores performances. Recomenda-se também apresentar ao decisor estratégias operacionais na simulação de curto prazo segundo cenários de precipitação e vazão afluente registrados com abordagens conservadoras, intermediárias e intensas, melhorando a tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

- AHMAD, I. *et al.* A linear bi-level multi-objective program for optimal allocation of water resources. **PLOS ONE**, v. 13, n. 2, p. 1–25, 2018.
- ANA - Agência Nacional de Águas. **Séries Históricas de Estações**. 2021. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 07 de março de 2021.
- ANTONIOU, A.; LU, W. **Practical Optimization: Algorithms and Engineering Applications**. New York: Springer, 2007. 675 p.
- ALJARAH, I.; LUDWIG, S. A. **MapReduce intrusion detection system based on a particle swarm optimization clustering algorithm**. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Cancun, Mexico, p. 955–962, 2013.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento - Reservatórios**. 2021. Disponível em: <<https://www.apac.pe.gov.br/monitoramento/190-monitoramento/526-reservatorios-2>>. Acesso em: 07 de março de 2021.
- ASSIS, J. M. O.; SOBRAL, M. C. M.; SOUZA, W. M. 2014. Análise de Detecção de Variabilidades Climáticas com Base na Precipitação nas Bacias Hidrográficas do Sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, p. 630-645, 2014.
- BAGHAEE, H. *et al.* Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system. **Energy**, v. 115, n. P1, p. 1022-1041, 2016.
- BELEGUNDU, A. D.; CHANDRUPATLA, T. R. **Optimization Concepts and Applications in Engineering**. USA.: Cambridge University Press, 2011. 479 p.
- BOERINGER, D.W.; WERNER, D.H. Particle swarm optimization versus genetic algorithms for phased array synthesis. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 52, n. 3, p. 771–779, 2004.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. Resolução ANA nº 411, de 22 de setembro de 2005. Brasília, ANA, 2005.
- CAMPOS, J. N. B. Secas e políticas públicas no semiárido: ideias, pensadores e períodos. **Estudos Avançados**, v. 28, p. 65-88, 2014.
- CARINI, M. *et al.* Modelling and optimization of least-cost water distribution networks with multiple supply sources and users. **Ricerche di Matematica**, v. 67, n. 2, p. 465–479, 2018.
- CHANG, L. C.; CHANG, F. J. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 12–20, 2009.
- CHEN, C. M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. **Journal of the American Society for Information Science and Technology**, v. 57, n. 3, p. 359-377, 2006.

CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CAMPOS, J. N. B. The Issue of Water in the Brazilian Semi-Arid Region. In: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (Eds.). **Waters of Brazil**. Springer International Publishing, p. 59-71, 2017.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 61-82, 2008.

CIRILO, J. A.; NETO, A. R.; RAMOS, N. M. R.; FORTUNATO, C. F.; SOUZA, J. D. S.; BEZERRA, S. T. M. Management of water supply systems from interbasin transfers: case study in the Brazilian semiarid region. **Urban Water Journal**, DOI: 10.1080/1573062X.2021.1925703, 2021.

CIRILO, J. A.; VERÇOSA, L. F. M.; GOMES, M. M. A.; FERRAZ, G. F.; SILVA, B. M. Development and application of a rainfall-runoff model for semi-arid regions. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 25, p. 1-19, 2020.

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. **Plano Abreviado de Reassentamento Involuntário para Implantação da Adutora de Água Bruta do Pirangi**. Projeto de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco - PSH/PE, Recife, 2016.

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. **Informações fornecidas pela gerência da COMPESA**. 2020a.

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. **Relatório Integrado de Administração**. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos, 2020b.

COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. **Notícias**. 2021. Disponível em: <<https://servicos.compesa.com.br/noticias/>>. Acesso em: 10 de maio de 2021.

COTEC - CONSULTORIA TÉCNICA LTDA. **Estudo de Impacto Ambiental: Barragem Rio do Prata**. Recife, 1995. 419p.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente. **Relatório de Impacto Ambiental: Sistema Adutor do Agreste Pernambucano**. Engecorps, Conestoga-Rovers e associados, 2009.

DAI, C. *et al.* Conjunctive Water Use Optimization for Watershed-Lake Water Distribution System under Uncertainty: a Case Study. **Water Resources Management**, v. 30, n. 12, p. 4429–4449, 2016.

DORIGO, M., STÜTZLE, T. **Ant Colony Optimization**. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 321 p.

EBERHART, R. C.; SHI, Y. **Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization**. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, v. 1, p. 84-88, 2000.

FIGUEIREDO, C. M. H. *et al.* **Introdução aos Algoritmos Randomizados**. 26º Colóquio Brasileiro de Matemática, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada - IMPA, 2007.

GAING, Z. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 19, n. 2, p. 384-391, 2004.

GAO, X.; LIU, Y.; SUN, B. Water shortage risk assessment considering large-scale regional transfers: a copula-based uncertainty case study in Lunan, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 23, p. 23328–23341, 2018.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. U.S.A.: Addison-Wesley Longman Publishing Company, 1989. 432 p.

HIGGINS, A.; ARCHER, A.; HAJKOWICZ, S. A stochastic non-linear programming model for a multi-period water resource allocation with multiple objectives. **Water Resources Management**, v. 22, n. 10, p. 1445–1460, 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>>. Acesso em: 07 de março de 2021.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos do INMET**. 2021. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 07 de março de 2021.

HU, S. *et al.* Total control-based unified allocation model for allowable basin water withdrawal and sewage discharge. **Science China Technological Sciences**, v. 53, n. 5, p. 1387–1397, 2010.

KAR, R. *et al.* Crazyness based Particle Swarm Optimization algorithm for FIR band stop filter design. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 7, p. 58-64, 2012.

KARABOGA, D.; BASTURK, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. **Journal of Global Optimization**, v. 39, n. 3, p. 459-471, 2007.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Particle Swam Optimization**. In: IEEE International Conference on Neural Networks, Australia, v. 4, p. 1942-1948, 1995.

KENNEDY, J.; EBERHART, R.C. **A discrete binary version of the particle swarm algorithm**. 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation. Orlando, FL, USA, p. 4104 – 4108, 1997.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C.; SHI, Y. **Swarm Intelligence**. San Francisco: Morgan Kaufmann/ Academic Press, 2001.

LI, W. *et al.* Chance-constrained dynamic programming for multiple water resources allocation management associated with risk-aversion analysis: A case study of Beijing, China. **Water (Switzerland)**, v. 9, n. 8, 2017.

LIU, K. *et al.* Optimal operation of interbasin water transfer multireservoir systems: an empirical analysis from China. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 7, p. 1–11, 2019.

- MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; DE SOUSA, F. D. A. S.; DANTAS, F. R. C. 2010. Analysis of the standardized precipitation index for the Paraíba state, Brazil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 1, p. 204–214, 2010.
- MA, X. *et al.* Multi-preference based interval fuzzy-credibility optimization for planning the management of multiple water resources with multiple water-receiving cities under uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 591, n. July, p. 125259, 2020.
- MENDONÇA, E. A. **Análise da precipitação nas mesorregiões do estado de Pernambuco.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 107, 2016.
- MILLONAS, M. M. Swarms, phase transitions, and collective intelligence. In: LANGTON, C.G. Langton (Ed.). **Artificial Life III**. MA: Addison-Welsey, 1994, p. 417-445.
- MORADI, M.H.; ABEDINIE, M. **A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems.** 2010 Conference Proceedings IPEC, Singapore, p. 858-862, 2010.
- MORAES, M. B. DA C.; NAGANO, M. S. Cash balance management: A comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 34, n. 4, p. 373-379, 2012.
- MOSTAGHIM, S.; BRANKE, J.; SCHMECK, H. **Multi-objective particle swarm optimization on computer grids.** Conference: GECCO '07: Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation. New York, NY, USA, p. 869-875, 2007.
- NABINEJAD, S.; MOUSAVI, S. J.; KIM, J. H. Sustainable Basin-Scale Water Allocation with Hydrologic State-Dependent Multi-Reservoir Operation Rules. **Water Resources Management**, v. 31, n. 11, p. 3507–3526, 2017.
- PAN, Q.-K.; TASGETIREN, M. F.; LIANG, Y.-C. A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v.35, n. 9, p. 2807–2839, 2008.
- PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N. **Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications.** Herhey, PA: Information Science Reference, 2010. 329 p.
- PEDRASA, M.; SPOONER, T.D.; MACGILL, I.F. Scheduling of Demand Side Resources Using Binary Particle Swarm Optimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 3, p. 1173–1181, 2009.
- PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. Projetc BRLi. **Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio do Capibaribe.** TOMO I (vol 1, 2 e 3) e TOMO IV. Recife, 2010.

- POWER, D. J. Decision Support Systems: A Historical Overview. In: BURSTEIN, F.; HOLSAPPLE, C. W. (Ed.). **Handbook on Decision Support Systems 1**. Berlim, Heidelberg: Springer, 2008, p. 121-140.
- QU, G. D.; LOU, Z. H. Application of particle swarm algorithm in the optimal allocation of regional water resources based on immune evolutionary algorithm. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, v. 18, n. 5, p. 634–640, 2013.
- RAMOS, N. M. R. **Modelagem na gestão de sistemas hídricos integrados do semiárido brasileiro: Estudo de caso do Agreste pernambucano**. Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 149, 2017.
- REBOUÇAS, A. C. **Panorama da degradação do ar, da água doce e da terra no Brasil**. São Paulo: IEA/USP, 1997.
- REN, K. *et al.* Assessing the reliability, resilience and vulnerability of water supply system under multiple uncertain sources. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119806, 2020.
- SERAPIÃO, A. B. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. **Revista Controle & Automação**, v. 20, n. 3, p. 271-304, 2009.
- SHEHATA, I. A. M., LEITE, J. P. B. **Otimização de Projetos**. Notas de Aula do Curso de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.
- SILVA, S. M. **Avaliação da implementação dos programas ambientais propostos nos estudos de impactos ambientais de barragens em Pernambuco**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Recife, p. 156, 2016.
- SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2018**. 2020. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018>>. Acesso em: 07 de março de 2021.
- SPRAGUE, R.H.; CARLSON, E. D. **Building effective decision support systems**. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1982. 329 p.
- WANG, J. *et al.* Optimal allocation of water resources based on water supply security. **Water (Switzerland)**, v. 8, n. 6, 2016.
- WANG, Q. *et al.* Optimal Operation of Bidirectional Inter-Basin Water Transfer-Supply System. **Water Resources Management**, v. 29, n. 9, p. 3037–3054, 2015.
- WHITE, T.; PAGUREK, B. Towards Multi-Swarm Problem Solving in Networks. **Proceedings International Conference on Multi Agent Systems**. Paris, France, 1998, p. 333-340.
- XU, W.; CHEN, C. Optimization of Operation Strategies for an Interbasin Water Diversion System Using an Aggregation Model and Improved NSGA-II Algorithm. **Journal of**

**Irrigation and Drainage Engineering**, v. 146, n. 5, p. 1–10, 2020.

YAN, Z. *et al.* An ameliorative whale optimization algorithm for multi-objective optimal allocation of water resources in Handan, China. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2018.

YANG, X.; KARAMANOGLU, M. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: An Overview. In: YANG, X. *et al.* (Eds.). **Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation**. Elsevier, 2013, p. 3-23.

YAO, H.; GEORGAKAKOS, A. Assessment of Folsom Lake response to historical and potential future climate scenarios: 2. Reservoir management. **Journal of Hydrology**, v. 249, n. 1-4, p. 176–196, 2001.

YU, S., WEI, Y.-M., WANG, K. A PSO–GA optimal model to estimate primary energy demand of China. **Energy Policy**, v. 42, p. 329–340, 2012.