

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE PORTFÓLIOS DE PLANEJAMENTO E
GESTÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO URBANO
DO DISTRITO FEDERAL NO CONTEXTO DE
INCERTEZAS PROFUNDAS**

ANDRESSA PEREIRA GIACOMAZZO

**ORIENTADORA: CONCEIÇÃO DE MARIA ALBUQUERQUE
ALVES**

COORIENTADOR: BERNARDO CARVALHO TRINDADE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2020

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE PORTFÓLIOS DE PLANEJAMENTO E GESTÃO DO
SISTEMA DE ABASTECIMENTO URBANO DO DISTRITO
FEDERAL NO CONTEXTO DE INCERTEZAS PROFUNDAS**

ANDRESSA PEREIRA GIACOMAZZO

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS**

APROVADA POR:

**Prof^ª Conceição de Maria Albuquerque Alves, PhD (ENC-UnB)
(Orientadora)**

**Bernardo Carvalho Trindade, PhD (SUEZ NA)
(Coorientador)**

**Prof. Alexandre Kepler Soares, Dr. (ENC-UNB)
(Examinador Interno)**

**Prof^ª Samiria Maria Oliveira da Silva, Dra. (PosDEHA-CT/UFC)
(Examinadora Externa)**

BRASÍLIA/DF, 16 DE DEZEMBRO DE 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

GIACOMAZZO, ANDRESSA PEREIRA

Análise de Portfólios de Planejamento e Gestão do Sistema de Abastecimento Urbano do Distrito Federal no Contexto de Incertezas Profundas. [Distrito Federal] 2020.

xxii, 176p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2020).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Incertezas Profundas

2. Planejamento Adaptativo

3. Abastecimento de Água

4. WaterPaths

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GIACOMAZZO, A. P. (2020). *Análise de Portfólios de Planejamento e Gestão do Sistema de Abastecimento Urbano do Distrito Federal no Contexto de Incertezas Profundas*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM – 233/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 176p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Andressa Pereira Giacomazzo.

TÍTULO: Análise de Portfólios de Planejamento e Gestão do Sistema de Abastecimento Urbano do Distrito Federal no Contexto de Incertezas Profundas.

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

Andressa Pereira Giacomazzo
andressa.giacomazzo@gmail.com

Dedico
aos meus amados pais,
Márcia e Leandro,
que na vida me ensinaram:
o valor do trabalho,
da disciplina,
da persistência,
da honestidade
e da caridade.
A vocês:
todo o meu amor,
toda a minha gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos e oportunidades concedidas. A Ele toda honra e toda glória.

Aos meus amados pais, Márcia e Leandro, por todo amor e apoio incondicional. Vocês são os meus maiores exemplos e minha grande fonte de inspiração. Às minhas queridas irmãs, Gabriella e Patrícia, por todas as orações e por genuinamente torcerem pelas minhas conquistas. Aos meus demais familiares, por todo carinho e incentivo.

Ao Franck, por toda paciência, compreensão e cumplicidade durante o desenvolvimento da pesquisa, sobretudo nos momentos mais difíceis. Obrigada por não medir esforços em me fazer feliz e em transformar meus dias cinzentos em dias ensolarados.

À minha orientadora, Professora Conceição, por todas as valiosas ideias compartilhadas e pela confiança depositada em meu trabalho. Obrigada por valorizar cada progresso de minha pesquisa e por sempre buscar me tranquilizar ao longo dessa jornada.

Ao meu coorientador, Bernardo, minha mais profunda gratidão por toda ajuda concedida, sem a qual não teria concluído essa pesquisa, e por partilhar comigo tantos conhecimentos e reflexões.

Ao professor Raul Matsushita, pela pronta disponibilidade em me ajudar com a modelagem das séries temporais, sempre com muito empenho e boa vontade.

Aos pesquisadores da Universidade de Cornell (EUA), sobretudo ao Professor Patrick Reed, por possibilitar que eu utilizasse os recursos computacionais da universidade para executar as simulações e ao colega David Gold, pelos esclarecimentos prestados.

Aos professores Alexandre, Samiria e Koide, por contribuírem com o aperfeiçoamento dessa pesquisa.

Às minhas amigas Ingrid e Thais, por tornarem meus dias de estudo muito mais prazerosos.

À CAESB e à ADASA, por todos os dados e esclarecimentos fornecidos.

Ao CNPq e à FAP/DF, pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento da pesquisa e à realização da visita técnica à Universidade de Cornell (EUA), respectivamente.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram com essa pesquisa, muito obrigada!

RESUMO

ANÁLISE DE PORTFÓLIOS DE PLANEJAMENTO E GESTÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO URBANO DO DISTRITO FEDERAL NO CONTEXTO DE INCERTEZAS PROFUNDAS

O planejamento de sistemas de abastecimento urbano compreende horizontes extensos e é influenciado por uma série de incertezas, muitas das quais carecem de consenso quanto às suas distribuições de probabilidade, a exemplo das mudanças climáticas, da disponibilidade de recursos financeiros e das alterações no ambiente regulatório. Tais fatores, denominados na literatura como incertezas profundas, impõem grandes desafios à concepção de políticas de abastecimento urbano robustas. Nesse sentido, a presente pesquisa teve por objetivo explorar, sob condições profundamente incertas, políticas de gestão e planejamento do sistema de abastecimento de água urbano do Distrito Federal (DF) ao longo dos próximos 40 anos (2020 a 2059). Tais políticas foram concebidas com o auxílio do sistema WaterPaths, software cuja estrutura de simulação estocástica e adaptativa possibilitou a otimização de critérios técnicos e financeiros sob ampla gama de cenários. Durante a otimização, ações de mitigação de secas (restrições de uso da água e transferências de água) foram estrategicamente combinadas aos investimentos em ampliação da infraestrutura hídrica, a fim de subsidiar a tomada de decisão de curto e de longo prazo, respectivamente. As políticas otimizadas evidenciaram que, a partir de 2025, serão necessários ao menos dois grandes projetos de expansão da infraestrutura de oferta de água para suprir a demanda futura de abastecimento urbano do DF e para preservar os níveis de seus principais reservatórios, Descoberto e Santa Maria: i) o Sistema Corumbá, com capacidade de produção de 5.600 l/s; ii) e o Sistema Paranoá, com capacidade de produção de 2.100 l/s. Constatou-se também o papel estratégico das medidas de curto prazo (transferências e restrições de uso da água), visto que, em momentos cujas condições eram bastante desfavoráveis (baixos níveis dos reservatórios e capacidade de tratamento saturada), tais alternativas estavam disponíveis para uso imediato, contribuindo para a manutenção da confiabilidade dos sistemas hídricos. Por fim, os resultados evidenciaram as diferentes vulnerabilidades associadas aos Sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria e demonstraram que o primeiro é significativamente mais suscetível à ocorrência de estresses hídricos. Desse modo, os portfólios explorados nessa pesquisa constituem uma importante ferramenta de auxílio à tomada de decisão no âmbito da gestão e do planejamento dos sistemas hídricos de abastecimento urbano do DF.

Palavras-chave: incertezas profundas, otimização, planejamento adaptativo, sistema de abastecimento urbano, companhia de saneamento, WaterPaths.

ABSTRACT

EXPLORING PLANNING AND MANAGEMENT PORTFOLIOS FOR THE URBAN WATER SUPPLY SYSTEM OF THE FEDERAL DISTRICT UNDER DEEP UNCERTAINTIES

Urban water supply systems planning and management comprises wide horizons and includes a multitude of uncertainties, many of which lack consensus on their underlying probability distributions, such as climate change, financial resources availability and changes in the regulatory environment. These factors, referred as deep uncertainties by an extensive body of literature, pose great challenges to robust water supply portfolio design. This research thereby aimed to explore, under deeply uncertain conditions, water supply system planning and management policies for the Federal District of Brazil (FDB) over the next 40 years (2020-2059). These policies were designed with the aid of the WaterPaths system, a software whose stochastic and adaptive simulation framework enabled to optimize technical and financial criteria under a wide range of scenarios. During the optimization, drought mitigation instruments (water transfers and water use restrictions) were strategically combined to storage capacity expansion infrastructure investments in order to inform short and long-term decision making, respectively. The resulted policies showed that at least two major water infrastructure projects will be needed to supply the FDB future urban water demand and to preserve its main reservoir levels, Descoberto and Santa Maria: the Corumba and the Paranoa water system with a minimum production capacity of 128 MDG and 48 MGD, respectively. The short-term measures (water transfers and water use restrictions) also played a strategic role, since they were ready to be used at times when conditions were quite unfavorable (low reservoir levels and saturated treatment capacity). Finally, the results showed the different vulnerabilities of the Descoberto and Torto/Santa Maria water systems and demonstrated that the former is significantly more susceptible to the occurrence of water stresses. Then, the portfolios explored in this study constitute an important tool to aid in decision making processes regarding to the urban water supply systems planning and management of the FDB.

Key-words: deep uncertainties, optimization, adaptive planning, urban water supply system, water utility, WaterPaths.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 – OBJETIVO GERAL.....	5
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .	6
3.1 – SEGURANÇA HÍDRICA NO CONTEXTO DO ABASTECIMENTO URBANO: DIFICULDADES E DESAFIOS.....	6
Crise hídrica no Distrito Federal	10
3.2 – PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO CONTEXTO DE INCERTEZAS PROFUNDAS	15
3.3 – SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO APLICADOS À GESTÃO E AO PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS.....	20
3.4 – WATERPATHS: UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA APLICADO À GESTÃO E AO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO NO CONTEXTO DE INCERTEZAS PROFUNDAS	22
3.4.1 – Definição e cálculo das métricas de risco de falha (RdF) de curto e de longo prazo	24
3.4.2 – Balanço de massa do modelo.....	28
3.4.3 – Instrumentos de mitigação de secas e instrumentos financeiros	29
3.4.4 – Investimentos em ampliação da infraestrutura de oferta de água.....	30
3.4.5 – Representação e avaliação das incertezas.....	31
3.4.6 – Funções objetivo implementadas no WaterPaths	32
3.4.6.1 – Confiabilidade do fornecimento (fCONF).....	32
3.4.6.2 – Frequência de restrição (fFR)	33
3.4.6.3 – Valor presente líquido do custo de infraestrutura (fIVPL).....	34
3.4.6.4 – Custo anual médio (fCAM)	35
3.4.6.5 – Custo do pior primeiro percentil (fCPPP).....	36
3.4.7 – Processo de otimização acoplado ao WaterPaths: análise multiobjetivo por meio de algoritmos evolucionários.....	37
3.4.8 – Estudo de caso utilizado como referência para o desenvolvimento do WaterPaths acoplado ao Borg.....	41
4. ESTUDO DE CASO APLICADO AO DISTRITO FEDERAL PARA OBTENÇÃO DE PORTFÓLIOS DE ABASTECIMENTO URBANO ..	43
4.1 – DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO ESTUDO DE CASO.....	43
4.1.1 – Caracterização da área de estudo.....	43

4.1.2 – Modelagem do sistema de abastecimento urbano	48
4.1.2.1 – Definição e composição dos cenários representativos dos estados do mundo (<i>states of the world</i>)	52
4.1.2.2 – Infraestruturas de oferta de água para abastecimento urbano.....	54
4.1.2.3 – Balanço hídrico das infraestruturas de oferta de água	59
4.1.2.4 – Instrumentos de mitigação de secas.....	61
4.1.2.5 – Instrumentos financeiros.....	67
4.1.2.6 – Métrica de Risco de Falha (RdF).....	67
4.2 – ETAPAS DO PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO SAAU DO DF	68
4.2.1 – Geração das séries temporais sintéticas e dos multiplicadores escalares	69
4.2.1.1 – Séries sintéticas de vazão	69
4.2.1.2 – Séries sintéticas de taxas de evaporação.....	74
4.2.1.3 – Séries sintéticas de demanda	75
4.2.1.4 – Amostragem dos fatores de incerteza profunda	88
4.2.2 – Identificação e análise das políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF	91
4.2.2.1 – Formulação do problema de otimização.....	91
4.2.2.2 – Amostragem de cenários para geração e avaliação das políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF.....	95
4.2.2.3 – Experimento computacional	97
5. SÉRIES TEMPORAIS SINTÉTICAS	101
5.1 – SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÃO.....	101
5.1.1 – Descoberto e Corumbá IV	101
5.1.2 – Santa Maria e Paranoá	104
5.2 – SÉRIES SINTÉTICAS DE TAXAS DE EVAPORAÇÃO.....	111
5.3 – SÉRIES SINTÉTICAS DE DEMANDA	113
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	115
6.1 – ANÁLISE DAS RELAÇÕES DE TROCA ENTRE AS FUNÇÕES OBJETIVO DAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO.....	115
6.1.1 – Definição do espaço viável de soluções	118
6.1.2 – Performance individual de cada companhia.....	121
6.2 – VARIÁVEIS DE DECISÃO DAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO	125
6.3 – ANÁLISE DAS INFRAESTRUTURAS CONSTRUÍDAS NAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO.....	128
6.4 – COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DOS RESERVATÓRIOS NAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO	142

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	151
APÊNDICES	165
A. ESTRUTURA TARIFÁRIA DA CAESB (ABASTECIMENTO DE ÁGUA)	166
B. CONSUMO PER CAPITA MÉDIO DAS REGIÕES ADMINISTRATIVAS DO DISTRITO FEDERAL	167
C. RELAÇÃO ÁREA X VOLUME DOS RESERVATÓRIOS	169
D. VAZÕES REMANESCENTES DOS SISTEMAS HÍDRICOS DE ABASTECIMENTO	170
E. PROJEÇÃO POPULACIONAL URBANA (2018 a 2059) POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO TERRITORIAL (UPT) DO DISTRITO FEDERAL..	171
F. PROJEÇÃO POPULACIONAL URBANA (2018 a 2059) POR REGIÃO ADMINISTRATIVA (RA) DO DISTRITO FEDERAL	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Fatores de incerteza profunda implementados no WaterPaths.....	32
Tabela 4.1 - Capacidade de produção (abastecimento de água no DF).....	43
Tabela 4.2 - Infraestruturas de oferta de água que compõem cada companhia (CAESB_DESB e CAESB_TSM).....	46
Tabela 4.3 - Caracterização das demandas anuais referentes aos anos de 2019 e 2059.....	50
Tabela 4.4 - Quantitativo de unidades residenciais alocadas em cada faixa de consumo. .	51
Tabela 4.5 - Tarifas de água atribuídas a cada categoria de usuário para a realização da modelagem.....	52
Tabela 4.6 - Tarifas de esgoto atribuídas a cada companhia de saneamento para a realização da modelagem.....	52
Tabela 4.7 - Histórico dos reajustes tarifários da CAESB.	54
Tabela 4.8 - Fatores de incerteza profunda considerados no estudo de caso dessa pesquisa.	54
Tabela 4.9 - Principais características das infraestruturas de oferta atualmente utilizadas pelas companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM.	55
Tabela 4.10 - Projetos de ampliação da infraestrutura de oferta de abastecimento urbano.	57
Tabela 4.11 - Fração da demanda de água convertida em efluente tratado e lançada no Lago Paranoá.	60
Tabela 4.12 - Cronologia de implementação das principais medidas de combate à crise hídrica do DF e variações de consumo registradas.....	63
Tabela 4.13 - Resumo das principais características da Política de Restrição implementada no estudo de caso dessa pesquisa.	65
Tabela 4.14 – Resumo das principais características da Política de Transferência implementada no estudo de caso dessa pesquisa.....	66
Tabela 4.15 – Estações fluviométricas utilizadas para realização da modelagem.	70
Tabela 4.16 - Séries temporais de evaporação utilizadas para a realização da modelagem.	74
Tabela 4.17 – Projeção da população urbana do Distrito Federal (2018 – 2059).	79
Tabela 4.18 – UPTs do Distrito Federal e respectivas RAs.	80
Tabela 4.19 - Evolução da participação percentual relativa de cada UPT na população urbana do DF entre 2010 e 2018.	81
Tabela 4.20 - Evolução da participação percentual relativa de cada RA na população urbana de sua respectiva UPT entre 2010 e 2018.....	82

Tabela 4.21 - Comparação da projeção populacional obtida nessa pesquisa com a projeção populacional estimada no PDSB (GDF, 2017b).....	83
Tabela 4.22 – Índices de perdas na distribuição de água.....	86
Tabela 4.23 – Fatores de incerteza profunda e respectivos intervalos de amostragem aplicados.	90
Tabela 4.24 - Variáveis de decisão associadas às estratégias de curto prazo de gestão das secas – restrições de uso da água, transferências de água e fundo de contingência – para cada companhia (CAESB_DESB e CAESB_TSM).	94
Tabela 4.25 - Variáveis de decisão associadas ao RdF de longo prazo, que funcionam como limiares para desencadear a construção de infraestrutura por cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).....	94
Tabela 4.26 - Variáveis de decisão responsáveis por determinar a ordem de construção das infraestruturas pertencentes a cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).....	95
Tabela 4.27 - Valores atribuídos à métrica de ϵ -dominância para cada função objetivo. ...	95
Tabela 5.1 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente decenal (Dw) referentes à modelagem das séries temporais da vazão afluyente ao reservatório do Descoberto e de Corumbá IV.	102
Tabela 5.2 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente sazonal (Sw) referentes à modelagem das séries temporais da vazão afluyente ao reservatório do Descoberto e de Corumbá IV.	102
Tabela 5.3 - Modelo de decomposição obtido para a vazão afluyente aos reservatórios do Descoberto e de Corumbá IV.	103
Tabela 5.4 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente decenal (Dw) referentes à modelagem dos afluentes Milho Cozido, Santa Maria e Vargem Grande.	105
Tabela 5.5 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente sazonal (Sw) referentes à modelagem dos afluentes Milho Cozido, Santa Maria e Vargem Grande.	105
Tabela 5.6 - Modelo de decomposição obtido para as séries temporais de vazão dos afluentes da represa de Santa Maria (Milho Cozido, Santa Maria e Vargem Grande).....	106
Tabela 5.7 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente decenal (Dw) referentes à modelagem dos afluentes Bananal, Riacho Fundo, Torto, Gama e Cabeça de Veado.....	108
Tabela 5.8 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente sazonal (Sw) referentes à modelagem dos afluentes Bananal, Riacho Fundo, Torto, Gama e Cabeça de Veado.....	109

Tabela 5.9 - Modelo de decomposição obtido para as séries temporais de vazão dos afluentes do Lago Paranoá (Bananal, Riacho Fundo, Torto, Gama e Cabeça de Veado).....	110
Tabela 5.10 - Estimativa dos coeficientes da componente sazonal (Sw) correspondente às séries temporais de evaporação dos reservatórios Descoberto, Santa Maria e Paranoá....	111
Tabela 5.11 - Modelo de decomposição resultante para as séries temporais de evaporação referentes ao reservatório do Descoberto, de Santa Maria, do Paranoá e de Corumbá IV.	112
Tabela 5.12 - Projeção da demanda anual de água por companhia (demanda de referência).	114
Tabela 6.1 - Ordem de construção das infraestruturas hídricas nas políticas “A”, “B”, “C”, “D” e “E” (formulação II – modelo sem fundo de contingência).	126
Tabela 6.2 - Estatística de construção de cada opção de infraestrutura nas políticas sem fundo de contingência que atendem aos critérios de desempenho.	130
Tabela A.1 - Estrutura Tarifária da CAESB (Abastecimento de Água).....	166
Tabela B.1 - Consumo per capita médio (l/hab.dia) das regiões administrativas do Distrito Federal. Fonte: PDSB (GDF, 2017b).	167
Tabela C.1 - Relação Área x Volume dos reservatórios.....	169
Tabela D.1 - Vazões remanescentes dos sistemas hídricos de abastecimento.	170
Tabela E.1 - Projeção populacional urbana (2018 a 2059) por UPT/DF.	171
Tabela F.1 - Projeção populacional urbana (2018 a 2059) das RAs pertencentes à UPT Central, Oeste, Leste e Sul do DF.	173
Tabela F.2 - Projeção populacional urbana (2018 a 2059) das RAs pertencentes à UPT Adjacente I e Adjacente II do DF.	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Diagnóstico do serviço de abastecimento urbano de água no Brasil.	9
Figura 3.2 - Distribuição espacial da vulnerabilidade hídrica.	10
Figura 3.3 - Relação entre a vazão média anual captada, a vazão média anual afluyente e a pluviometria média na Bacia do Alto Descoberto entre os anos de 1986 e 2016.	11
Figura 3.4 - Cotas do reservatório do Descoberto no 1º dia de abril de cada ano (1987 - 2019).	12
Figura 3.5 - Cotas da represa de Santa Maria no 1º dia de março de cada ano (1987 - 2019).	13
Figura 3.6 - Exemplo de sequenciamento das novas infraestruturas implantadas ao longo do horizonte simulado em um único cenário.	23
Figura 3.7 - Fluxo de simulação principal do WaterPaths.	24
Figura 3.8 - Funcionamento da métrica de risco de falha (RdF) de curto e de longo prazo.	25
Figura 3.9 - Relação entre o planejamento de infraestrutura de longo prazo e ações operacionais de curto prazo.	26
Figura 3.10 - Exemplo de soluções não dominadas ("A" e "B") em um problema de minimização com dois objetivos.	38
Figura 3.11 - Mecanismo de funcionamento do algoritmo evolucionário multiobjetivo Borg.	39
Figura 3.12 - Estratégias de Paralelização do algoritmo Borg: a) versão Master-Worker (Borg MS); e b) versão Multi-Master (Borg MM).	40
Figura 3.13 - Mapa da área de estudo “Research Triangle”, que evidencia as áreas abastecidas por Raleigh, Cary, Durham e OWASA e interconexões regionais entre os sistemas de distribuição de água.	41
Figura 4.1 - Área de estudo: infraestruturas de oferta de água para abastecimento urbano.	45
Figura 4.2 - Área de estudo: regiões administrativas abastecidas por cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).	47
Figura 4.3 – Entradas e saídas do modelo de simulação aplicado ao estudo de caso do SAAU/DF.	48
Figura 4.4 - Configuração básica dos principais componentes do sistema de abastecimento urbano referente ao estudo de caso SAAU/DF.	49
Figura 4.5 - Estações fluviométricas utilizadas.	69

Figura 4.6 - Painel esquerdo: evolução temporal da vazão agregada (média diária por semana) referente ao reservatório do Descoberto, de 10/10/1985 a 30/04/2018. Painel direito: evolução do logaritmo da vazão.	72
Figura 4.7 - Fluxograma dos procedimentos adotados para a geração das séries de demanda de água de cada companhia.	77
Figura 4.8 - Esquema de amostragem de cenários.	96
Figura 4.9 - Exemplo da aplicação do hipervolume.	98
Figura 4.10 - Evolução do hipervolume para cada uma das quatro inicializações aleatórias – Formulação I (modelo com fundo de contingência).	99
Figura 4.11 - Evolução do hipervolume para cada uma das quatro inicializações aleatórias – Formulação II (modelo sem fundo de contingência).	99
Figura 5.1 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de vazão gerada pelo modelo $Q_w = \exp(D_w + S_w + \varepsilon_w)$ com $\varepsilon_w \sim N(0, 0,32)$ para o reservatório do Descoberto, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.	104
Figura 5.2 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de vazão gerada pelo modelo $Q_w = \exp(D_w + S_w + \varepsilon_w)$ com $\varepsilon_w \sim N(0, 0,35)$ para o reservatório de Corumbá IV, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.	104
Figura 5.3 - Painel esquerdo: exemplo de série sintética de vazão gerada para a represa de Santa Maria, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.	107
Figura 5.4 - Painel esquerdo: exemplo de série sintética de vazão gerada para o reservatório do Paranoá, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.	110
Figura 5.5 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de evaporação gerada para a represa de Santa Maria, de 1970 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.	112
Figura 5.6 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de evaporação gerada para o reservatório Descoberto, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.	113
Figura 5.7 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de evaporação gerada para o Lago Paranoá, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.	113

Figura 5.8 - Painel esquerdo: sobreposição de 10 séries sintéticas de demanda referentes à companhia CAESB_DESC. Painel direito: sobreposição de 10 séries sintéticas de demanda referentes à companhia CAESB_TSM.	114
Figura 6.1 - Conjunto de todas as políticas não dominadas (Frente de Pareto) referentes à otimização com fundo de contingência (azul) e sem fundo de contingência (marrom)...	116
Figura 6.2 - Políticas que atendem aos critérios de desempenho estabelecidos ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$) correspondentes à otimização com fundo de contingência (linhas azuis) e sem fundo de contingência (linhas marrons).	120
Figura 6.3 - Performance das companhias (a) CAESB_DESC e (b) CAESB_TSM nas políticas correspondentes à formulação I (modelo com fundo de contingência) que atendem aos critérios de desempenho estabelecidos ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$).....	122
Figura 6.4 - Performance das companhias (a) CAESB_DESC e (b) CAESB_TSM nas políticas correspondentes à formulação II (modelo sem fundo de contingência) que atendem aos critérios de desempenho estabelecidos ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$).....	123
Figura 6.5 – Políticas “A” (verde), “B” (azul claro), “C” (amarelo), “D” (azul escuro) e “E” (vermelho) selecionadas para as próximas análises.	124
Figura 6.6 - Variáveis de decisão associadas às políticas “A”, “B”, “C”, “D” e “E” (formulação II – modelo sem fundo de contingência).....	125
Figura 6.7 – Projetos de infraestrutura de oferta de água implementados pelas companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM nas políticas "A", "B", "C", "D" e "E".....	133
Figura 6.8 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "A". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.....	137
Figura 6.9 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "B". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.....	138
Figura 6.10 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "C". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.....	139
Figura 6.11 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "D". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.....	140

Figura 6.12 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "E". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.....	141
Figura 6.13 – Evolução semanal do volume disponível (hm ³), da vazão afluyente (hm ³ /semana) e da demanda (hm ³) de cada reservatório em 250 cenários simulados (Políticas “A” e “B”).	143
Figura 6.14 - Evolução semanal do volume disponível (hm ³), da vazão afluyente (hm ³ /semana) e da demanda (hm ³) de cada reservatório em 250 cenários simulados (Políticas “C”, “D” e “E”).	144

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Taxa de crescimento anual
ADASA	Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal
ANA	Agência Nacional de Águas
$AR(x_s)$	Área dos reservatórios como função do volume armazenado
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
Borg MS	Versão Master-Worker do algoritmo de otimização multiobjetivo Borg
Borg MM	Versão Multi-Master do algoritmo de otimização multiobjetivo Borg
C_j	Capacidade máxima de armazenamento da companhia (volume total)
CAC	Custo anual da companhia
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CAF	Banco de Desenvolvimento da América Latina
CAM	Custo anual médio (função objetivo)
CC	Custo de construção (incerteza profunda)
CCS	Custo do contrato de seguro
CDI	Certificado de Depósito Interbancário (índice de correção monetária)
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CONF	Confiabilidade do fornecimento de água (função objetivo)
CPPP	Custo do pior primeiro percentil (função objetivo)
CS	Cobertura do seguro
CT	Custo de transferência de água
CTE	Centro Tecnológico de Engenharia LTDA
$*_d$	Índice da série de demanda sintética gerada
DAPP	Dynamic Adaptive Policy Pathways
DF	Distrito Federal
DI	Matriz com as séries de demanda (irrestrita) de água das companhias
Dr	Demanda de água associada a cada infraestrutura hídrica
D_w	Padrão decenal do modelo de decomposição
\hat{D}_w	Estimativa da componente decenal do modelo de decomposição
D^w	Demanda de água real (efetivamente atendida) na semana w
E	Matriz com as séries de taxas de evaporação dos reservatórios
E_w	Evaporação média diária do modelo de decomposição na semana t

<i>Ef</i>	Vetor com a vazão de efluentes lançados nos sistemas hídricos
ER	Eficácia dos estágios de restrição de uso da água (incerteza profunda)
ETA	Estação de Tratamento de Água
EUA	Estados Unidos da América
<i>*f</i>	Índice do fator de incerteza profunda
<i>F</i>	Vetor com os valores das funções objetivo
<i>FC</i>	Quantia disponível no fundo de contingência
FR	Frequência de restrição (função objetivo)
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
<i>f_{CAM}</i>	Função objetivo de custo anual médio
<i>f_{CON}</i>	Função objetivo de confiabilidade do fornecimento de água
<i>f_{CPPP}</i>	Função objetivo de custo do pior primeiro percentil
<i>f_{FR}</i>	Função objetivo de frequência de restrição
<i>f_{IVPL}</i>	Função objetivo de valor presente líquido do custo de infraestrutura
GDF	Governo do Distrito Federal
<i>H_{k,w}</i>	Harmônicos que caracterizam uma função periódica
hm³	Hectômetro cúbico
<i>i</i>	Número do cenário
IBC	Incertezas Bem-caracterizadas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>i_f</i>	Limite inferior do fator de incerteza profunda
IGP-M	Índice Geral de Preços do Mercado
INPC	Índice Nacional de Preços ao Consumidor
IP	Incertezas Profundas
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IRAS	Interactive River Aquifer Simulation
IVPL	Valor presente líquido do custo de infraestrutura (função objetivo)
<i>j</i>	Índice referente à companhia de saneamento
LHS	Latin Hypercube Sampling
MOEA	Algoritmo Evolucionário Multiobjetivo
MORDM	Many Objective Robust Decision Making
<i>n</i>	Tamanho da série temporal
<i>N_{IP}</i>	Quantidade de fatores de incerteza profunda

N_r	Quantidade de cenários simulados
N_{RdF}	Quantidade de simulações utilizadas no cálculo da métrica de RdF
N_{ys}	Quantidade de anos do horizonte de planejamento
OCDE	Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
OCI	Matriz com os vetores que armazenam a ordem de construção das infraestruturas de cada companhia
ONU	Organização das Nações Unidas
p	Período de repetição do padrão de uma função
PA	Período de amortização (incerteza profunda)
PDAD	Pesquisa Distrital de Amostra por Domicílios
PDSB	Plano Distrital de Saneamento Básico
PGIRH/DF	Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do DF
PL	Prazo para obtenção da licença de construção (incerteza profunda)
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PMT	Parcela do empréstimo adquirido a ser liquidada
PR	Perda de receita decorrente de restrições de uso da água
$P(y)$	População urbana no ano y
PTARH	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
q	Frequência de uma função periódica
Q	Matriz com as séries de vazões afluentes dos sistemas hídricos
Qa	Vazão natural afluente ao reservatório
Qr	Matriz com as vazões remanescentes dos sistemas hídricos
Qrm	Matriz com as vazões descarregadas por sistemas hídricos a montante
Q_w	Vazão média diária do modelo de decomposição na semana t
Qv	Matriz com as vazões vertidas dos reservatórios
$*_R$	Identificador da série de demanda de água de referência
RA	Região Administrativa
RAT	Receita anual total da companhia
RDM	Robust Decision Making
RdF	Risco de Falha
S	Taxa de crescimento semanal
SANEAGO	Companhia de Saneamento de Goiás

SAAU	Sistema de Abastecimento de Água Urbano
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SARIMA	Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average
S_c	Volume crítico (abaixo do qual o sistema registra falha)
s_f	Limite superior do fator de incerteza profunda
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIGA	Sistema de Informação para o Gerenciamento da Alocação de Água
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SOW	State of the World
SSD	Sistemas de Suporte à Decisão
S_w	Padrão sazonal do modelo de decomposição
\hat{S}_w	Estimativa da componente sazonal do modelo de decomposição
TAE	Tarifa de água e esgoto (incerteza profunda)
TD	Taxa de desconto (incerteza profunda)
TJ	Taxa de juros (incerteza profunda)
TR	Taxa de Referência (índice de correção monetária)
T_{RdF}	Quantidade de semanas que compõem as simulações realizadas para subsidiar o cálculo do RdF
T^w	Volume de água transferido na semana w
UHE	Usina Hidroelétrica
UnB	Universidade de Brasília
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UPT	Unidade de Planejamento Territorial
v	Número de coeficientes ajustados no modelo de decomposição
VP	Custo do projeto de infraestrutura (valor do principal)
VPL	Valor presente líquido
w	Número da semana
WEAP	Water Evaluation and Planning
X	Matriz de “estados variáveis no tempo” de cada companhia
x_{rdfCP}	Vetor com os valores semanais de risco de falha de curto prazo
x_{rdfLP}	Vetor com os valores semanais de risco de falha de longo prazo

x_s	Vetor com os volumes semanais totais disponíveis de cada companhia
y	Número do ano
Z	Escalar aleatório gerado pelo método LHS
α_k, β_k	Coefficientes da série de Fourier
ε_w	Ruído aleatório gaussiano do modelo de decomposição
σ^2	Variância do ruído aleatório ε_w
θ	Matriz com os vetores das variáveis de decisão que compõem as políticas de abastecimento
θ_{cafc}	Vetor de contribuições anuais ao fundo de contingência
θ_{ci}	Vetor de gatilhos de construção de infraestruturas
θ_{gr}	Vetor de gatilhos de restrição de uso da água
$\theta_{\Delta gr}$	Vetor de gatilhos de restrição mais severa de uso da água
θ_{gt}	Vetor de gatilhos de transferência de água
θ^*	Política de gestão e planejamento do SAAU pertencente à frente de Pareto
Ψ_{IBC}	Matriz composta pelos vetores com as amostras dos fatores de incerteza bem-caracterizada
Ψ_{IP}	Matriz composta pelos vetores com as amostras dos fatores de incerteza profunda
ψ_s	Matriz composta por Ψ_{IBC} e Ψ_{IP}
$\mathcal{D}(i, s)$	Função densidade de probabilidade assumida para os fatores de incerteza profunda
u	Distribuição uniforme

1. INTRODUÇÃO

As preocupações emergentes com a escassez de água em áreas urbanas estão associadas a várias incertezas, como, por exemplo, o aumento expressivo da demanda, a capacidade de investimento das companhias, alterações no ambiente regulatório e mudanças de padrão de consumo. Tais fatores têm sido referenciados na literatura como incertezas profundas (IP) em oposição às incertezas bem-caracterizadas (IBC), aqui livremente traduzidas de *deep uncertainties* (DU) e *well-characterized uncertainties* (WCU), respectivamente. As IBC correspondem àquelas adequadamente representadas por distribuições de probabilidade, de modo que o seu comportamento futuro pode ser descrito por meio de métodos estatísticos, a exemplo de séries de vazão (Borgomeo *et al.*, 2015; Herman *et al.*, 2016; Kirsch *et al.*, 2013; Lamontagne *et al.*, 2018; Stedinger e Taylor, 1982). As IP, por outro lado, carecem de consenso quanto às suas distribuições de probabilidade, bem como sobre possíveis resultados individuais ou coletivos (Knight, 1921, Kwakkel *et al.*, 2016, Marchau *et al.*, 2019; Walker *et al.*, 2003; Walker *et al.*, 2010). Pesquisas recentes, por sua vez, demonstram que incertezas profundas impõem grandes dificuldades à concepção de políticas de abastecimento robustas, cujo objetivo consiste em assegurar, a longo prazo, a provisão contínua e adequada desse serviço, bem como o equilíbrio financeiro dos atores envolvidos (Hasnoot *et al.*, 2013; Kwakkel *et al.*, 2013; Trindade *et al.*, 2019, 2020; Zeff *et al.*, 2014, 2016). Nesse sentido, proporcionar segurança hídrica de abastecimento urbano tem se tornado uma tarefa cada vez mais desafiadora para as companhias de saneamento.

Entre 2016 e 2018, o Distrito Federal foi acometido por intensa escassez hídrica, que afetou diretamente as condições operacionais do serviço de abastecimento público (GDF, 2017a). Apesar de o volume de precipitação da época ter sido consideravelmente inferior à média histórica da região, aspectos relacionados à gestão e ao planejamento dos sistemas hídricos contribuíram para o desencadeamento da crise hídrica, como a ausência de obras de ampliação da infraestrutura de oferta por um período superior a 16 anos (GDF, 2017a).

Na ocasião, medidas foram implementadas em caráter emergencial com o intuito de possibilitar a recuperação dos níveis dos principais reservatórios de abastecimento, Descoberto e Santa Maria. Tais medidas contemplavam, entre outras ações, restrições de uso da água, as quais impactaram negativamente as atividades domésticas, comerciais e agrícolas da região (GDF, 2017a). Além de inconvenientes à população, tem-se que essas medidas

resultam em instabilidades financeiras para as companhias devido à redução da receita arrecadada e aos custos adicionais de operabilidade dos sistemas produtores (Herman *et al.*, 2014; Trindade *et al.*, 2017; Zeff *et al.*, 2014).

Projetos de ampliação da infraestrutura de oferta, por sua vez, geralmente se estendem por muitos anos, demandam elevados investimentos, ocasionam impactos ambientais e possivelmente conflitos entre usuários de água bruta, o que dificulta e posterga a sua execução (Gleick, 2002; Trindade *et al.*, 2019; Zeff *et al.*, 2016). Desse modo, as companhias de saneamento têm integrado aos empreendimentos de ampliação da oferta hídrica (longo prazo) determinadas ações de gestão e estratégias de cooperação (curto prazo), a exemplo dos acordos de transferência de água (Mozenter *et al.*, 2018; Palmer e Characklis, 2009; Trindade *et al.*, 2020).

Todavia, tais estratégias não são suficientes para evitar, de modo permanente, a eventual necessidade de expansão da infraestrutura de abastecimento, tendo em vista que a disponibilidade hídrica é constantemente ameaçada por condições climáticas extremas, como secas severas, e pelo crescimento exacerbado da demanda de água em centros urbanos acometidos pelo adensamento populacional (Hall *et al.*, 2019; Shafer e Fox, 2017).

Dessa forma, estudos têm demonstrado que tão importante quanto as ações gerenciais imediatas são os esforços regulares para a ampliação da infraestrutura de abastecimento de água, visto que a frequência e a severidade de implementação das medidas emergenciais são fundamentalmente moldadas pela maneira como as estratégias adaptativas de longo prazo são empregadas pelas companhias (Borgomeo *et al.*, 2018; Trindade *et al.*, 2019; Zeff *et al.*, 2016).

É nesse contexto que pesquisadores têm se empenhado em desenvolver sistemas de apoio à decisão (SAD) que integrem investimentos de longo prazo, associados às obras de ampliação da infraestrutura de oferta, com ações gerenciais de curto prazo, a exemplo de restrições de uso da água e transferências, implementadas para mitigar as consequências das secas durante a sua ocorrência (Borgomeo *et al.*, 2018; Herman *et al.*, 2014; Trindade *et al.*, 2019; Zeff *et al.*, 2016). Tais estratégias devem ser analisadas de modo complementar no contexto dos portfólios de abastecimento de água, a fim de assegurar maior confiabilidade à prestação do serviço de abastecimento, bem como maior estabilidade financeira às companhias.

Essa integração, todavia, não consiste em uma tarefa trivial, dado que o planejamento de sistemas de abastecimento urbano compreende horizontes extensos e engloba uma série de incertezas relacionadas ao comportamento futuro das variáveis que exercem influência sobre tais sistemas. Dado que as condições ambientais, sociais e econômicas podem mudar ao longo do tempo, é fundamental que o planejamento de sistemas de abastecimento urbano seja conduzido a partir da inclusão sistemática dos fatores de incerteza e de processos adaptativos, a fim de reduzir as vulnerabilidades das políticas e estratégias elaboradas. Tais processos de planejamento, que incluem mecanismos formais de adaptação ao longo do tempo, têm demonstrado melhores desempenhos em relação àqueles baseados em condições estáticas e têm viabilizado o desenvolvimento de políticas mais robustas face às incertezas existentes (Beh *et al.*, 2015; Groves *et al.*, 2015; Herman *et al.*, 2014; Rosenzweig *et al.*, 2011; Trindade *et al.*, 2017, 2019).

Tais fatores motivaram a escolha do software de simulação estocástica WaterPaths (Trindade *et al.*, 2020) para subsidiar a análise de portfólios de abastecimento urbano no âmbito do Distrito Federal, proposta dessa pesquisa, considerando incertezas bem-caracterizadas e profundas inerentes ao planejamento e à gestão dos sistemas hídricos.

Concebido na Universidade de Cornell (EUA), o sistema WaterPaths consiste em uma plataforma para a modelagem macro, análise exploratória, e otimização de sistemas de infraestrutura de abastecimento de água, desenvolvida com o intuito de auxiliar companhias de saneamento nas tomadas de decisão de curto prazo (associadas às estratégias de mitigação das secas) e de longo prazo (investimentos em projetos de ampliação da infraestrutura de oferta) (Trindade *et al.*, 2020). Tendo em vista que ambas as estratégias podem ser prejudiciais às finanças das companhias, o modelo inclui instrumentos financeiros destinados a mitigar os efeitos decorrentes de oscilações em suas receitas e despesas.

O sistema WaterPaths tem como grande diferencial o fato de tais políticas serem avaliadas sob qualquer número de cenários profundamente incertos em cada simulação. Adicionalmente, a plataforma pode ser acoplada a algoritmos de otimização multiobjetivo, de modo a potencializar a exploração e a identificação de políticas robustas no espaço de soluções. As tomadas de decisão no WaterPaths, por sua vez, ocorrem a partir da avaliação do risco de falha do sistema, cujos cálculos são periodicamente atualizados por meio de mecanismos de feedbacks contínuos que retroalimentam-nos com novas informações (e.g. vazão, demanda, etc). O referido procedimento tem sido utilizado para tratar a presença de

incertezas profundas em decisões estratégicas de planejamento e gestão de sistemas hídricos de abastecimento urbano (Herman *et al.*, 2014; Trindade *et al.*, 2019; Watson e Kasprzyk, 2017).

Nesse contexto, os dois principais sistemas produtores que viabilizam a provisão de água no Distrito Federal, Descoberto e Torto/Santa Maria, foram modelados no sistema WaterPaths, de modo a possibilitar a compreensão de suas diferentes vulnerabilidades e particularidades, bem como a concepção de políticas robustas, responsáveis por conferir maior confiabilidade ao serviço de abastecimento urbano ao longo dos 40 anos futuros (2020 a 2059). Tal horizonte foi adotado por duas razões principais: a primeira consiste no fato de essa pesquisa explorar portfólios de abastecimento urbano que contemplam uma série de projetos de infraestrutura hídrica, os quais são implementados a longo prazo. Desse modo, faz-se necessário adotar um horizonte extenso, a fim de possibilitar que haja tempo suficiente para se analisar a oportunidade e necessidade associada à construção de cada uma dessas infraestruturas. A segunda consiste no fato de essa pesquisa utilizar séries de demanda de água produzidas a partir da projeção demográfica do DF elaborada pelo IBGE (IBGE, 2018), cujas estimativas populacionais se estendem até o ano de 2060.

Essa dissertação é composta pelos seguintes capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução: contextualização do problema de pesquisa, bem como de suas motivações;
- Capítulo 2 – Objetivos: definição dos objetivos, geral e específicos, a serem alcançados;
- Capítulo 3 – Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica: apresentação das principais temáticas estudadas para subsidiar a execução dessa pesquisa;
- Capítulo 4 – Estudo de caso aplicado ao Distrito Federal para obtenção de portfólios de abastecimento urbano: descrição do estudo de caso avaliado nessa pesquisa, bem como dos materiais e das metodologias utilizadas para alcançar os objetivos propostos;
- Capítulo 5 – Séries Temporais Sintéticas: apresentação das séries temporais hidrológicas e de demanda produzidas nessa pesquisa para subsidiar as simulações;
- Capítulo 6 – Resultados e Discussão: exposição e análise dos resultados obtidos; e
- Capítulo 7 – Conclusões e Recomendações: apresentação das conclusões dessa pesquisa, sistematizadas a partir da análise dos resultados, e de recomendações para trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1 – OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente pesquisa consiste em desenvolver políticas robustas de planejamento e gestão do sistema de abastecimento de água urbano (SAAU) do Distrito Federal, de modo a otimizar o desempenho técnico e financeiro da companhia de saneamento sob condições de incertezas profundas.

2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos da presente pesquisa:

- Descobrir políticas ótimas de Pareto para a gestão e o planejamento do SAAU do DF no contexto de incertezas profundas;
- Identificar e analisar, nas políticas otimizadas, as relações estabelecidas (*tradeoffs*) entre as funções objetivo avaliadas para o SAAU do DF a partir do WaterPaths;
- Analisar, nas políticas otimizadas, as estratégias complementares de curto e longo prazo empregadas pelas companhias de saneamento, bem como suas interrelações, voltadas à gestão do SAAU do DF; e
- Analisar, nas políticas otimizadas, o desempenho das opções de infraestrutura de oferta de água implantadas pela companhia de saneamento e a respectiva ordem na qual foram construídas ao longo do horizonte simulado.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir dos objetivos estabelecidos, apresentar-se-ão nesta seção as principais temáticas estudadas para subsidiar a compreensão e execução dessa pesquisa. O capítulo de Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica está disposto da seguinte maneira:

- Subitem 3.1 – Segurança hídrica no contexto do abastecimento urbano: dificuldades e desafios: apresentação dos principais desafios associados ao serviço de abastecimento urbano, com enfoque dado à região do Distrito Federal;
- Subitem 3.2 – Planejamento de sistemas de abastecimento de água no contexto de incertezas profundas: exposição dos principais conceitos e propostas da área de pesquisa destinada ao estudo da inclusão sistemática de fatores de incerteza no contexto do processo decisório, bem como suas implicações sobre o planejamento de sistemas hídricos de abastecimento urbano;
- Subitem 3.3 – Sistemas de apoio à decisão aplicados à gestão e ao planejamento de recursos hídricos: apresentação da aplicação de sistemas de apoio à decisão e seus desdobramentos sobre o planejamento e a gestão dos recursos hídricos de abastecimento urbano;
- Subitem 3.4 – WaterPaths: um sistema de simulação estocástica aplicado à gestão e ao planejamento de sistemas de abastecimento urbano no contexto de incertezas profundas: descrição das principais características e funcionalidades do modelo de simulação estocástica concebido para subsidiar o planejamento e a gestão de sistemas de abastecimento de água e adotado como ferramenta de apoio às análises realizadas na presente pesquisa.

3.1 – SEGURANÇA HÍDRICA NO CONTEXTO DO ABASTECIMENTO URBANO: DIFICULDADES E DESAFIOS

A água é um bem vital para o desenvolvimento das atividades humanas. Não obstante, a pressão incidente sobre os recursos hídricos tem se tornado cada vez mais alarmante, sobretudo em razão do elevado crescimento populacional e econômico. Estes, por sua vez, traduzem-se em expressivas taxas de urbanização e significativo grau de deterioração da qualidade do meio ambiente hídrico (ANA, 2002).

Srinivasan *et al.* (2017) afirmam que o conceito de segurança hídrica despontou em resposta à natureza multifacetada da crise global de água, caracterizada pela perspectiva de um futuro incerto quanto à disponibilidade hídrica em decorrência das mudanças climáticas e das demandas crescentes por esse recurso. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), segurança hídrica traduz-se em “*assegurar o acesso sustentável à água de qualidade, em quantidade adequada à manutenção dos meios de vida, do bem-estar humano e do desenvolvimento socioeconômico, em garantir proteção contra a poluição hídrica e desastres relacionados à água, bem como em preservar os ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política*” (UNESCO, 2013).

Diante do conceito exposto, tem-se que a gestão de recursos hídricos deve englobar quatro importantes dimensões da segurança hídrica: 1) acesso à água em quantidade e qualidade adequada; 2) resiliência quanto à ocorrência de eventos extremos (secas e inundações); 3) promoção do desenvolvimento econômico; e 4) preservação do meio ambiente (OCDE, 2013; UNESCO, 2013).

De modo particular, tem-se que as companhias de saneamento exercem papel central no contexto urbano da primeira dimensão apresentada. Nesse sentido, sob a perspectiva dos serviços de abastecimento de água, Brears (2017) define segurança hídrica como a garantia do atendimento à demanda de água em quantidade e qualidade suficiente. Todavia, tem-se que o planejamento de sistemas de abastecimento urbano é influenciado por uma série de fatores incertos, a exemplo do crescimento populacional, das mudanças climáticas, das limitações orçamentárias (Beh *et al.*, 2015; Herman *et al.*, 2014; Kwakkel *et al.*, 2016; Trindade *et al.*, 2017, 2019, 2020) e das alterações no ambiente regulatório, como as recentemente vivenciadas no Brasil. Tais incertezas, por sua vez, impõem grandes desafios à concepção de políticas de abastecimento urbano robustas, ou seja, políticas que atendam aos critérios de desempenho sob ampla gama de cenários incertos, de modo a contribuir com a segurança hídrica da população e a sustentabilidade financeira das companhias de saneamento.

Segundo pesquisa realizada pelo Banco de Desenvolvimento da América Latina (CAF) em 26 cidades de porte médio distribuídas entre 17 países da América Latina, a gestão ineficaz da infraestrutura de oferta e das redes de distribuição de água nos núcleos urbanos constitui o fator de maior ameaça à efetivação da segurança hídrica nessas regiões (CAF, 2018). As crescentes demandas de água associadas à disponibilidade hídrica cada vez mais limitada

nessas regiões tornam as áreas urbanas extremamente vulneráveis quanto aos serviços de abastecimento de água (Bonzanigo *et al.*, 2018; McNabb, 2019).

Melo (2016) afirma que as taxas crescentes de urbanização agravam o desafio de se integrar as políticas de gestão de recursos hídricos com as de gestão territorial, o que contribui para a depleção das fontes de água disponíveis no perímetro das cidades. Diante disso, os governos têm tido a necessidade frequente de buscar água de regiões cada vez mais distantes para suprir suas próprias demandas, de modo que o acesso a esse recurso tem se tornado significativamente mais caro e conflituoso.

É nesse contexto que se insere o Distrito Federal, região acometida por acelerada expansão urbana (em grande parte, irregular) desde a intensificação dos movimentos migratórios, iniciados na década de 1960. Após a inauguração de Brasília, nova capital do país, a busca por empregos e moradias na região conduziu ao aumento expressivo das taxas de crescimento populacional, o que desencadeou fortes pressões à infraestrutura de serviços sanitários e ao meio ambiente. Segundo o último censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população urbana do Distrito Federal, em 2010, totalizava 96% de sua população total.

No cenário nacional, de acordo com dados de 2016 do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), cerca de 7% da população brasileira não dispunha dos serviços de abastecimento, o que na época equivalia a, aproximadamente, 14,5 milhões de pessoas (Brasil, 2018). Além disso, observa-se, na Figura 3.1, que apenas 27% da população brasileira é atendida satisfatoriamente pelos serviços de abastecimento urbano no país. Fatores como a poluição hídrica e os períodos prolongados de seca reforçam essa realidade, a qual é agravada pela ausência ou pelo caráter reativo da elaboração de planos de segurança hídrica.

Segundo o documento *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil* (ANA, 2017), entre 2013 e 2018, alguns centros urbanos, como São Paulo, Rio de Janeiro e Distrito Federal, enfrentaram rigorosa escassez hídrica, ocasionada não apenas pela combinação de baixos índices pluviométricos com o crescimento da demanda, mas também pela ausência de integração entre programas de mitigação de secas (ações de curto prazo) e investimentos de longo prazo em projetos de ampliação da infraestrutura de oferta de água. Estima-se que aproximadamente 48 milhões de pessoas tenham sido afetadas por secas ou estiagens no

país. O mesmo documento afirma que 4.824 eventos de seca foram registrados nesse mesmo período, os quais prejudicaram consideravelmente o fornecimento de água para abastecimento público e para a realização de atividades econômicas por parte de setores dependentes de água, como energia (hidroelétricas), irrigação, produção industrial e navegação.

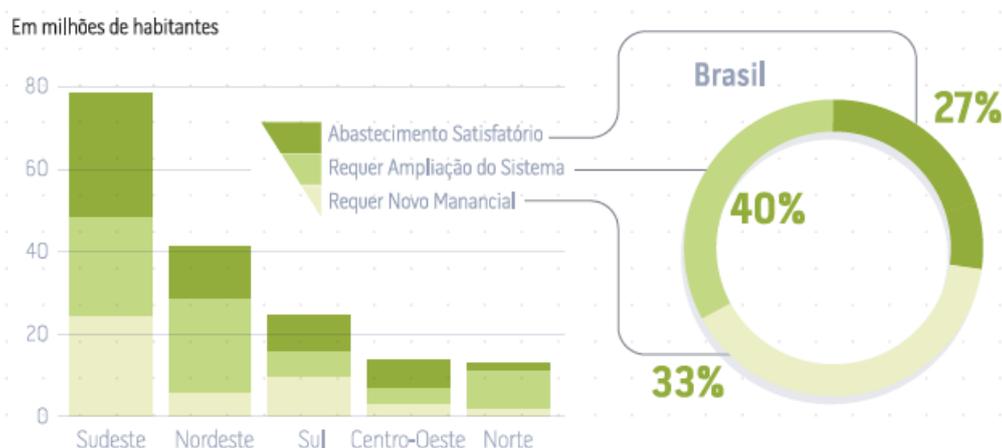


Figura 3.1 - Diagnóstico do serviço de abastecimento urbano de água no Brasil.
 Fonte: Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (ANA, 2017).

Pesquisas recentes (Borgomeo *et al.*, 2018; Haasnoot *et al.*, 2013; Kwakkel *et al.*, 2016; Trindade *et al.*, 2019, 2020; Watson e Kasprzyk, 2017; Zeff *et al.*, 2016), por sua vez, têm demonstrado a importância da definição de portfólios de abastecimento de água que contemplem estratégias de longo prazo, associadas à expansão da infraestrutura de oferta, bem como ações operacionais de curto prazo, voltadas à gestão das secas, a exemplo de restrições de uso da água e de transferências de água entre sistemas.

Zeff *et al.* (2016), em um estudo de caso aplicado à região da Carolina do Norte (EUA), observaram que a frequência de implementação das ações operacionais de curto prazo é fundamentalmente moldada pela maneira como as companhias de saneamento integram tais medidas às opções de expansão da infraestrutura de oferta. Desse modo, a combinação entre alternativas de curto e de longo prazo apresentou-se como importante estratégia a ser adotada por companhias de saneamento que têm o objetivo de ampliar a confiabilidade e o desempenho dos sistemas de abastecimento urbano, sobretudo durante a ocorrência de secas (Zeff *et al.*, 2016; Trindade *et al.*, 2019). A mesma estratégia pode ser utilizada para melhorar a confiabilidade e o desempenho do SAAU do DF, ameaçado por dispor de baixa garantia hídrica, conforme se observa na Figura 3.2.

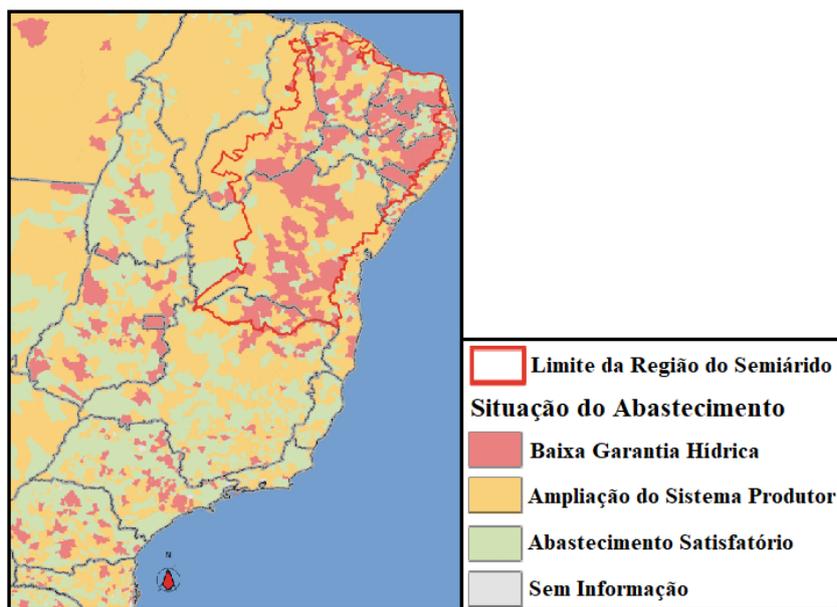


Figura 3.2 - Distribuição espacial da vulnerabilidade hídrica.
 Fonte: Conjuntura dos Recursos Hídricos – Informe 2014 (ANA, 2015).

Observa-se, portanto, que a elaboração de tais portfólios tem o potencial de favorecer a segurança hídrica de abastecimento urbano no Distrito Federal, de modo a combater secas futuras e evitar a ocorrência de novas crises hídricas, as quais impactam negativamente os diversos usuários e consumidores do setor, assunto este abordado a seguir.

Crise hídrica no Distrito Federal

O DF é composto por trinta e três regiões administrativas (RA) e possui população residente de aproximadamente três milhões (IBGE, 2020). Os serviços de abastecimento público de água são prestados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), cujo índice de atendimento urbano é de aproximadamente 99%, conforme dados do Plano Distrital de Saneamento Básico (PDSB) de 2017 (GDF, 2017b). Tal serviço é fiscalizado pela Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal (ADASA).

O abastecimento de água no DF ocorre por meio de cinco sistemas produtores principais: Descoberto, Torto/Santa Maria, Sobradinho/Planaltina, Brazlândia e São Sebastião. Os dois primeiros são responsáveis por fornecer o equivalente a 60,74% e 28,05% de água tratada, respectivamente, o que representa 82,6% da população atendida pela CAESB (ADASA, 2017a).

Destaca-se que a maioria absoluta do consumo de água registrado no DF provém de residências urbanas e rurais, totalizando cerca de 84,45%, enquanto 9,42% se refere à parcela

consumida em estabelecimentos comerciais, 5,61% em órgãos públicos distritais e federais, 0,46% em uso industrial e 0,06% em sistemas de irrigação (GDF, 2017a). Dessa forma, percebe-se que o abastecimento urbano tem grande relevância no contexto do DF e, portanto, requer a implementação de estratégias que ampliem a segurança hídrica da região, a fim de reduzir os riscos associados à incidência de secas.

Entre 2016 e 2018, o DF foi acometido por intensa escassez hídrica, ocasionada por condições climáticas desfavoráveis e agravada pela ausência de obras de ampliação da infraestrutura de oferta de água nas últimas duas décadas (GDF, 2017a). O volume de precipitação registrado nos anos hidrológicos de 2014/2015 e 2015/2016 foi consideravelmente inferior em relação à média histórica da região (Figura 3.3). Tais fatores, somados ao contínuo crescimento populacional do DF e consequente expansão da demanda de água, resultaram no rebaixamento dos níveis de água do reservatório do Descoberto e da represa de Santa Maria a patamares críticos, o que afetou diretamente o serviço de abastecimento. Observa-se, na Figura 3.3, o aumento progressivo da vazão captada na Bacia do Alto Descoberto, ocasionado pelo adensamento populacional no Distrito Federal. Em 2016, a vazão captada superou a vazão afluyente, dando origem à crise hídrica na região.

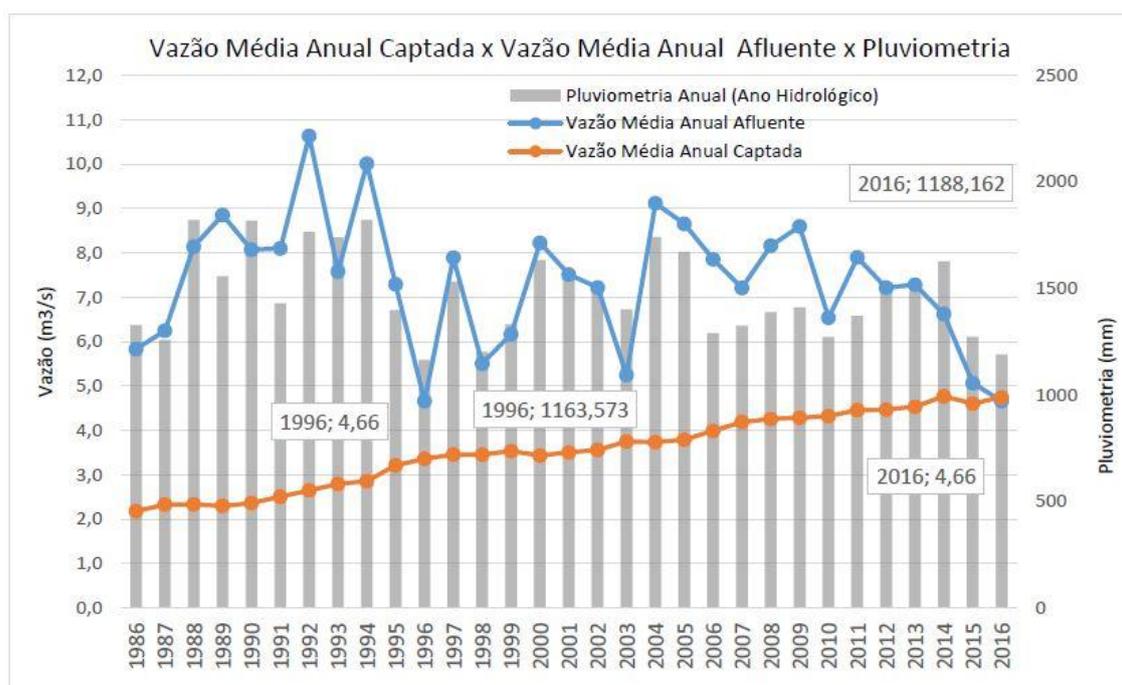


Figura 3.3 - Relação entre a vazão média anual captada, a vazão média anual afluyente e a pluviometria média na Bacia do Alto Descoberto entre os anos de 1986 e 2016.

Fonte: (GDF, 2017a).

Nesse contexto, em setembro de 2016, foi declarada situação crítica de escassez hídrica nos reservatórios do Descoberto e de Santa Maria, os dois principais mananciais dos sistemas produtores do DF (ADASA, 2016a). Por meio dos registros das cotas dos reservatórios do Descoberto e de Santa Maria (Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente), observa-se a gravidade da situação de baixa disponibilidade hídrica enfrentada naquela ocasião.

Em janeiro de 2017, a situação se agravou ainda mais, visto que o reservatório do Descoberto atingiu valores inferiores a 20% de sua capacidade máxima operacional, enquanto o reservatório de Santa Maria registrou 41,22% de sua capacidade. Diante disso, o Governo do DF (GDF) decretou situação de emergência pelo período de 180 dias (Distrito Federal, 2017). Procedeu-se também à elaboração do Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica (GDF, 2017a), o qual contempla as principais estratégias adotadas para mitigar os efeitos negativos da crise.

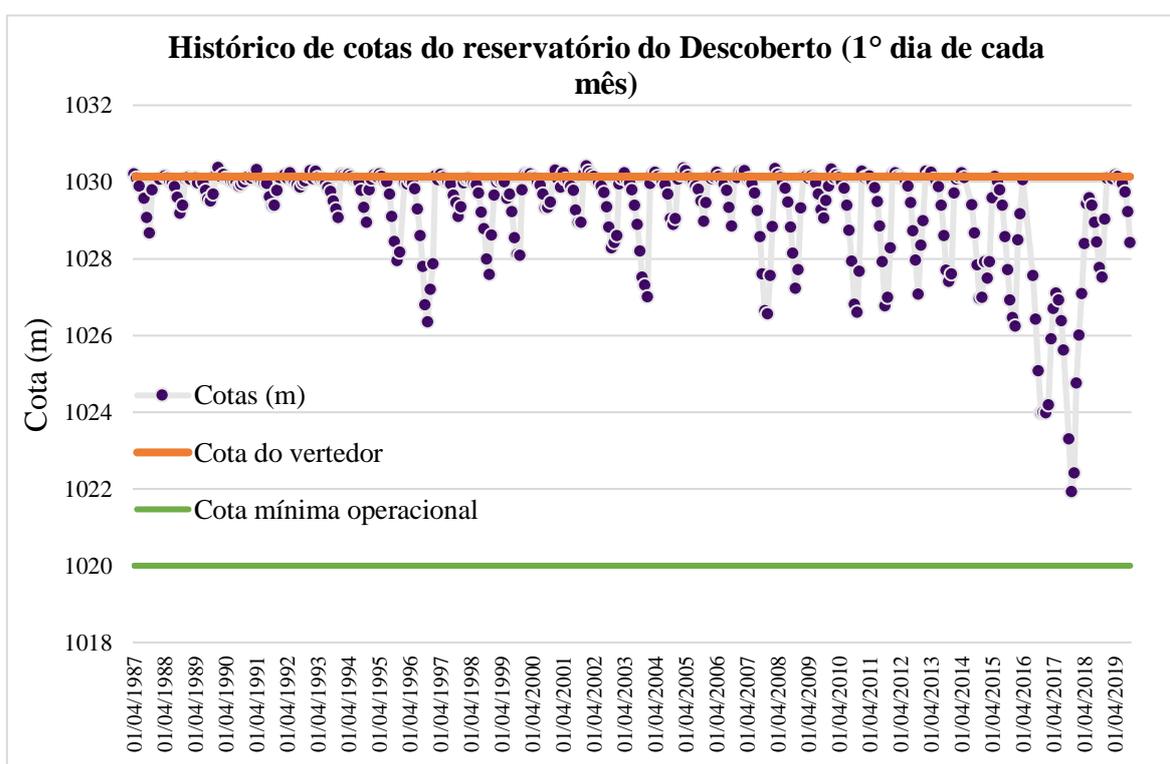


Figura 3.4 - Cotas do reservatório do Descoberto no 1º dia de abril de cada ano (1987 - 2019).

Registros acima da cota do vertedor indicam que o reservatório está vertendo.

Fonte: Portal *Hidroweb* (ANA, 2019a). Código da estação: 60435500.

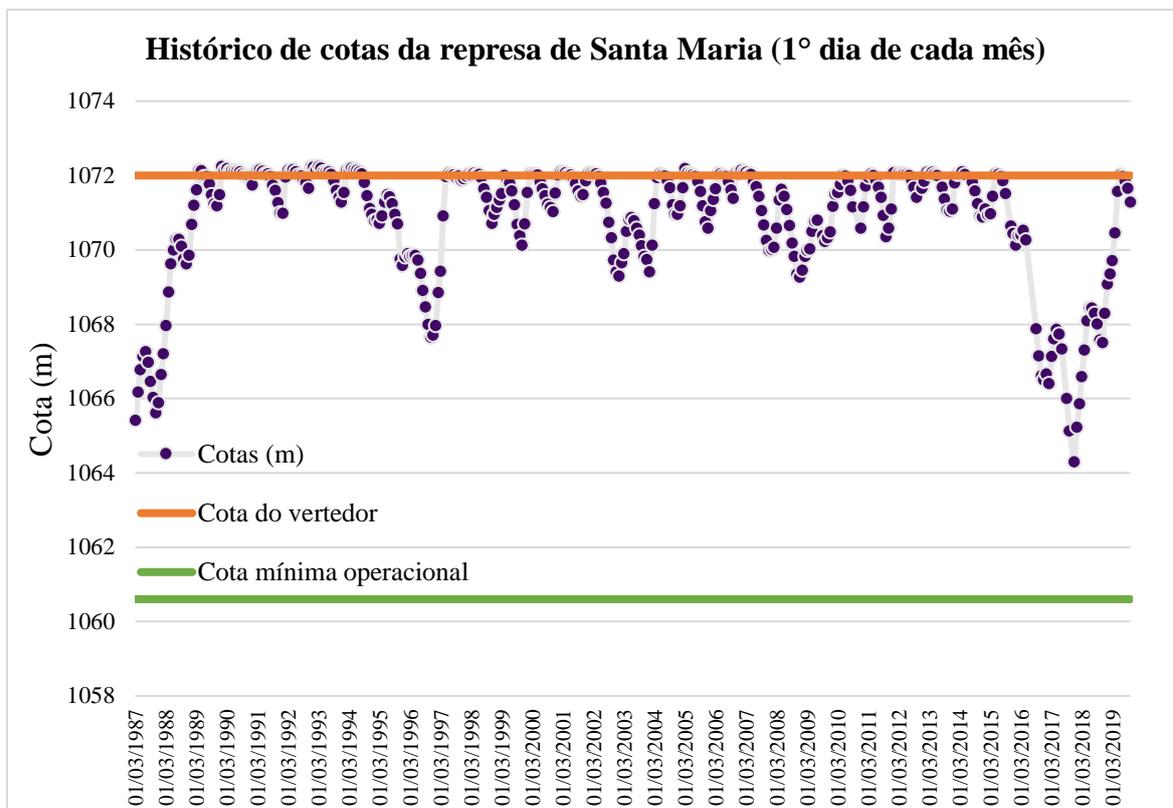


Figura 3.5 - Cotas da represa de Santa Maria no 1º dia de março de cada ano (1987 - 2019).

Registros acima da cota do vertedor indicam que o reservatório está vertendo.

Fonte: Portal *Hidroweb* (ANA, 2019a). Código da estação: 60477100.

Nesse sentido, a CAESB foi autorizada a adotar uma série de medidas restritivas (ADASA, 2016b). Dentre tais medidas, têm-se a redução de pressão na rede de distribuição de água, o rodízio de fornecimento de água entre localidades abastecidas por um mesmo sistema produtor e o incremento de medidas de incentivo à redução de consumo, principalmente campanhas de conscientização. O Plano de Racionamento estabeleceu que o período de interrupção do abastecimento de água deveria ser de 24 horas seguidas. Hospitais, hemocentros, centros de diálise e estabelecimentos de internação coletiva não foram submetidos ao referido plano (ADASA, 2016b).

Dessa forma, a CAESB implementou as seguintes medidas operacionais:

- 23/11/2016: início do plano de redução de pressão nas localidades abastecidas pelo Sistema Descoberto;
- 16/01/2017: início do plano de rodízio nas localidades abastecidas pelo Sistema Descoberto, com interrupção do abastecimento por 24 horas;

- 30/01/2017: início do plano de redução de pressão nas localidades abastecidas pelo Sistema Torto/Santa Maria; e
- 27/02/2017: início do plano de rodízio nas localidades abastecidas pelo Sistema Torto/Santa Maria, com interrupção do abastecimento por 24 horas.

Concomitantemente, a CAESB realizou reparos, substituiu redes antigas para controlar perdas e foi autorizada a cobrar tarifa de contingência sobre consumos superiores a 10 m³ mensais em todo o DF, com exceção de unidades prestadoras de serviço de caráter essencial. Aplicou-se, portanto, um percentual extra de 40% sobre a categoria residencial normal e 20% sobre as demais (residencial popular, comercial, industrial e pública) até junho de 2017, quando a tarifa de contingência foi suspensa (ADASA, 2016c, 2017b). Tais medidas permitiram poupar 14,7% em água bruta do Descoberto (GDF, 2017a).

Em julho de 2017, foi autorizada a utilização dos recursos oriundos da tarifa de contingência, a fim de viabilizar os investimentos necessários e complementares referentes à implantação do Subsistema Lago Norte (captação no Lago Paranoá) e à interligação dos Sistemas Torto/Santa Maria e Descoberto (ADASA, 2017c). O primeiro foi inaugurado em outubro de 2017, juntamente ao Subsistema de Captação de Água do Ribeirão Bananal. Ambos têm capacidade de produção aproximada de 700 l/s e foram executados em caráter emergencial, com o intuito de reforçar o Sistema Torto/Santa Maria (GDF, 2017b). As obras de interligação, por sua vez, foram finalizadas em 2017 e favoreceram a recuperação do reservatório do Descoberto, cujos níveis tornavam-se cada vez mais críticos (Figura 3.4). Dessa forma, as regiões do Guará I e II, Candangolândia, Núcleo Bandeirante e parte de Águas Claras e do Park Way passaram a ser abastecidas pelo Sistema Torto/Santa Maria (CAESB, 2018a). Entre outubro de 2017 e julho de 2018, deixou-se de retirar aproximadamente 15,2% do volume útil do reservatório do Descoberto devido às transferências provenientes do Sistema Torto/Santa Maria (CAESB, 2018a).

A redução do consumo por parte da população, as intervenções realizadas para ampliar a oferta hídrica no DF e a melhoria dos níveis de precipitação no período da quadra chuvosa de 2017 permitiram que o racionamento fosse suspenso em junho de 2018, após cerca de um ano e meio de restrições quanto ao uso dos recursos hídricos. Na ocasião, o GDF avaliou que a prestação do serviço de abastecimento de água pelos mananciais do DF encontrava-se estabilizada.

Durante a crise hídrica, muitos usuários foram prejudicados. Percebeu-se, com certa clareza, que a população carente sofreu de modo mais intenso as consequências da interrupção do abastecimento provocada pelo racionamento implantado, a exemplo daquelas que não dispunham de caixas d'água em suas residências e terminavam desabastecidas por períodos de até 72h ao longo das semanas. Atividades econômicas, sobretudo a dos agricultores, também foram impactadas, dado que o consumo humano é priorizado em situações de escassez hídrica (Brasil, 1997). Segundo a Secretaria de Agricultura, os agricultores locais foram prejudicados em aproximadamente R\$ 600 milhões, o que corresponde a 25% da riqueza anual gerada (Correio Braziliense, 2017).

Diante do exposto, observa-se que tão importante quanto à implementação das medidas operacionais de curto prazo, como as restrições de consumo impostas e as transferências realizadas, são os esforços regulares para a ampliação da infraestrutura de oferta. Tais estratégias, quando combinadas, possibilitam que as companhias de saneamento assegurem maior resiliência aos sistemas de abastecimento urbano, sobretudo durante a ocorrência de secas (Trindade *et al.*, 2019, 2020; Zeff *et al.*, 2016). Todavia, esta não consiste em uma tarefa trivial, visto que o planejamento associado à concepção de políticas de abastecimento urbano é caracterizado por elevado grau de incertezas. Nesse sentido, o gerenciamento de incertezas tem se tornado uma necessidade cada vez mais proeminente, dado o grau de imprevisibilidade associado às condições futuras, sejam elas referentes a questões climáticas, institucionais, sociais ou econômicas.

É nesse contexto que a literatura tem registrado a ascensão e proliferação de metodologias voltadas à inclusão sistemática dos fatores de incerteza profunda no âmbito do processo decisório (Bankes, 1993; Haasnoot *et al.*, 2013; Kasprzyk *et al.*, 2013; Kwakkel *et al.*, 2016; Walker *et al.*, 2001; Lempert *et al.*, 2003; Trindade *et al.*, 2019, 2020), assunto este abordado na seção a seguir.

3.2 – PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO CONTEXTO DE INCERTEZAS PROFUNDAS

Planejar o futuro envolve antecipar mudanças, sobretudo quando os planejamentos são de longo prazo e/ou estão associados à mitigação de eventos extremos (Borgomeo *et al.*, 2018; Kasprzyk e Reed, 2009; Marchau *et al.*, 2019; Trindade *et al.*, 2019). Ocorrências futuras, por sua vez, são permeadas de incertezas (Haasnoot *et al.*, 2013; Walker *et al.*, 2003; Yoe,

2019). De modo geral, o que caracteriza tais incertezas é a limitação de conhecimento, seja sobre os acontecimentos futuros propriamente ditos, seja sobre as ocorrências atuais e passadas (Walker *et al.*, 2013), principalmente pelo fato de o universo estar sujeito a constantes mudanças.

Incertezas impõem desafios aos processos de tomada de decisão na medida em que dificultam a concepção de políticas robustas, capazes de garantir os resultados almejados sob ampla gama de cenários distintos. Tal garantia, por sua vez, é ainda mais importante quando o processo decisório ocorre no âmbito de setores responsáveis por infraestruturas críticas e serviços essenciais, como o de abastecimento urbano.

Walker *et al.* (2003) apresentam quatro aspectos de um problema, cuja capacidade de caracterização e compreensão definirão os níveis de incerteza associados ao referido problema: (1) o estado futuro do mundo (cenário futuro), (2) o modelo representativo dos sistemas de interesse, (3) os resultados provenientes das políticas aplicadas sobre os sistemas e (4) o grau de importância atribuído por cada um dos atores interessados (*stakeholders*) aos diferentes resultados pretendidos, dado que estes frequentemente divergem quanto aos objetivos a serem alcançados por meio de um plano ou de uma política. Desse modo, observa-se que o processo de tomada de decisão é acometido e influenciado por incertezas associadas às condições futuras, à modelagem adequada das variáveis relevantes para o desempenho do sistema, às respostas do sistema diante da mudança de comportamento das variáveis relevantes e da implementação de políticas de gestão e planejamento, bem como às vantagens e desvantagens dos resultados advindos das políticas implementadas.

Nesse contexto, denomina-se uma situação de profundamente incerta quando não há conhecimento/consenso suficiente sobre: (1) modelos apropriados para descrever as interações entre as variáveis do sistema, (2) distribuições de probabilidade adequadas para representar o comportamento das variáveis do sistema e (3) como avaliar a conveniência ou oportunidade das diferentes respostas possíveis dos sistemas (Bonzanigo *et al.*, 2018; Kwakkel *et al.*, 2016; Marchau *et al.*, 2019). Tais características descrevem o que a literatura denomina de incerteza profunda (IP), as quais diferenciam-nas das incertezas bem-caracterizadas (IBC).

Tradicionalmente, tomadores de decisão atuantes nas mais distintas esferas assumem que o futuro pode ser previsto, o que resulta na elaboração de planos estáticos, baseados na análise

de um único e mais provável cenário futuro, geralmente obtido por meio da observação e extrapolação de registros passados (Haasnoot *et al.*, 2013). Tal planejamento apoia-se sobre a tradicional metodologia de construção de cenários determinísticos predefinidos. Contudo, tem-se que não apenas as condições ambientais estão aptas a mudar ao longo do tempo, mas também as perspectivas e os interesses da sociedade (Bosomworth *et al.*, 2017; Nair e Howlett, 2017; Scruton, 2013). Desse modo, o plano elaborado torna-se extremamente vulnerável diante de tais mudanças, visto que não inclui mecanismos formais de adaptação e tem seu sucesso condicionado à ocorrência das exatas condições futuras previstas. Decisões que negligenciam as incertezas profundas podem até abordar o problema razoavelmente bem no curto prazo, mas, numa perspectiva de longo prazo, representam riscos ao equilíbrio dos sistemas e aos resultados pretendidos (Marchau *et al.*, 2019).

O processo decisório conduzido sob a perspectiva de incertezas profundas não é amparado por paradigmas baseados unicamente em previsões futuras (conhecidos na literatura como prever e agir – *predict-then-act*); fundamenta-se, sobretudo, em simulações adaptativas, por meio das quais monitoram-se as respostas dos sistemas ao longo do tempo e adaptam-se as decisões implementadas conforme as circunstâncias se alteram. Os modelos não são utilizados como uma ferramenta de previsão, mas sim de geração e avaliação de futuros possíveis, operando como uma ferramenta exploratória, que busca identificar condições futuras responsáveis por desencadear consequências relevantes (Bankes, 1993). Nesse sentido, o paradigma “monitorar e adaptar” torna-se mais adequado para descrever a tomada de decisão baseada em incertezas profundas, visto que as reconhece e as inclui no processo de planejamento (Marchau *et al.*, 2019).

Diante desse contexto, diferentes pesquisadores têm estudado metodologias que possibilitem a inclusão sistemática dos fatores de incerteza profunda no âmbito do processo decisório, a fim de reduzir as vulnerabilidades das políticas e estratégias elaboradas. Como exemplos, citam-se as abordagens denominadas de *Many Objective Robust Decision Making – MORDM* (Kasprzyk *et al.*, 2013; Watson e Kasprzyk, 2017) – Tomada de Decisão Multiobjetivo Robusta – e *Dynamic Adaptive Policy Pathways – DAPP* (Haasnoot *et al.*, 2013; Kwakkel *et al.*, 2014) – Trajetórias Dinâmicas e Adaptativas de Políticas. Ambas têm sido amplamente empregadas como ferramentas de apoio ao planejamento de sistemas de abastecimento de água, visto que tais problemas englobam uma série de incertezas profundas

associadas a fatores políticos, econômicos, sociais e tecnológicos, bem como às mudanças climáticas (Haasnoot *et al.*, 2013; Trindade *et al.*, 2019, 2020).

A metodologia proposta inicialmente por Kasprzyk *et al.* (2013), denominada de *Many Objective Robust Decision Making* (MORDM), corresponde a uma extensão da abordagem designada de *Robust Decision Making* (RDM) (Bryant e Lempert, 2010; Lempert, 2002; Lempert *et al.*, 2003). Em ambas as metodologias, avalia-se a performance de políticas sob ampla gama de cenários futuros profundamente incertos, gerados por meio de experimentos e técnicas computacionais. Todavia, enquanto na proposta de RDM as políticas são definidas *a priori*, na metodologia MORDM estas são obtidas por meio de algoritmos de otimização multiobjetivo (Kasprzyk *et al.*, 2013). A partir da definição do problema, MORDM inicialmente emprega algoritmos de otimização (e.g. algoritmos evolucionários) multiobjetivo com o intuito de identificar as alternativas “ótimas”, ou seja, as políticas que apresentam as melhores performances sob o conjunto de cenários analisados. Em seguida, avalia-se a robustez de tais alternativas ao submetê-las a um espectro ainda maior de combinações dos fatores de incerteza profunda, de forma a identificar quais dessas políticas mantêm desempenho satisfatório sob os diversos estados futuros do mundo analisados (Watson e Kasprzyk, 2017).

Cabe destacar que a literatura especializada no estudo da influência de incertezas profundas sobre o processo decisório (*Decision Making under Deep Uncertainty – DMDU*) utiliza o termo “estados futuros do mundo” (*future states of the world – SOW*) para representar um conjunto de cenários futuros incertos. A expressão “estados futuros do mundo” remete à ideia de que muitas são as possibilidades de ocorrências futuras, bem como as incertezas associadas a cada uma delas, ao passo que o termo “cenário” é mais frequentemente relacionado à ideia de condições futuras pontuais e predefinidas, geralmente originadas a partir da variação de apenas um fator ou elemento. Entretanto, ambos possuem o mesmo significado.

Quanto à metodologia proposta por Haasnoot *et al.* (2013) e Kwakkel *et al.* (2014), seu objetivo principal consiste em possibilitar o desenvolvimento de planos dinâmicos e adaptativos que se adequem às mudanças circunstanciais. Para tanto, *Dynamic Adaptive Policy Pathways* (DAPP) faz uso de métricas que monitoram, ao longo do horizonte simulado, as condições nas quais determinada ação não mais contribui para atingir os objetivos definidos no plano, podendo conduzi-lo à falha (Haasnoot *et al.*, 2013). Deste

modo, caminhos alternativos (com ações alternativas predefinidas) são acionados sempre que os valores críticos das métricas de sinalização são atingidos, constituindo um processo cíclico, alimentado pelo monitoramento contínuo da resposta dos sistemas frente às ações implementadas e às mudanças das condições externas. Tais processos de planejamento, que incluem mecanismos formais de adaptação ao longo do tempo, têm demonstrado melhores desempenhos em relação àqueles baseados em condições estáticas e têm viabilizado o desenvolvimento de políticas robustas face às incertezas existentes (Beh *et al.*, 2015; Groves *et al.*, 2015; Rosenzweig *et al.*, 2011).

MORDM e DAPP são apenas alguns exemplos de importantes abordagens utilizadas no contexto do planejamento sob a perspectiva de incertezas profundas (para maiores informações, vide Marchau *et al.*, 2019). O sistema de modelagem utilizado na presente pesquisa, WaterPaths (Trindade *et al.*, 2020), emprega conceitos relacionados à metodologia proposta por DAPP (Haasnoot *et al.*, 2013; Kwakkel *et al.*, 2014) e MORDM (Kasprzyk *et al.*, 2013; Trindade *et al.*, 2019; Watson e Kasprzyk, 2017; Zeff *et al.*, 2016). Desse modo, o WaterPaths foi desenvolvido com o objetivo principal de possibilitar a concepção de políticas de abastecimento urbano de água sob a perspectiva de incertezas bem-caracterizadas e profundas, cuja estrutura adota regras de decisão adaptativas e mecanismos de feedbacks contínuos responsáveis por governar as ações implementadas ao longo do horizonte simulado (Trindade *et al.*, 2020).

Pode-se definir o WaterPaths como um sistema de simulação estocástica e apoio à decisão ou um software de modelagem, conforme designação dada pelos próprios autores (Trindade *et al.*, 2020). De modo mais abrangente, tem-se que os sistemas de apoio à decisão (SAD) constituem ferramentas frequentemente utilizadas para subsidiar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos em suas mais diversas aplicações: operação de reservatórios, abastecimento público, controle de quantidade e qualidade da água, caracterização do risco de secas e de cheias, outorgas de uso da água, entre outras. Desse modo, na seção a seguir serão descritas as principais funcionalidades associadas aos tradicionais SAD, bem como suas respectivas limitações.

3.3 – SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO APLICADOS À GESTÃO E AO PLANEJAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

Mysiak *et al.* (2005) afirmam que o conceito de Sistemas de Apoio à Decisão (SAD), ou Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), emergiu na década de 1970, ocasião em que tais ferramentas passaram a ser utilizadas para subsidiar a resolução de problemas caracterizados por descrições complexas, informações limitadas e variáveis não quantificáveis (Simonovic, 2009).

Os SAD auxiliam o usuário a acessar dados e informações, a identificar e formular problemas, a conceber e analisar alternativas e, por fim, a escolher o melhor curso de ação (Ono, 2008). Tais sistemas, portanto, têm sido frequentemente utilizados nas diversas áreas do conhecimento, sobretudo naquelas relacionadas a processos de gestão e planejamento (Nascimento, 2016).

A compreensão acerca das decisões mais adequadas a serem tomadas é facilitada pelo uso dos sistemas de apoio à decisão, pois estes viabilizam, de modo simplificado, a comparação dos resultados obtidos após a implementação de diferentes estratégias (Jamieson e Fedra, 1996). Além disso, ao propiciarem a simulação de cenários alternativos de gestão, tais sistemas possibilitam mensurar, com melhor precisão, os riscos associados à tomada de decisão inadequada ou tardia (Alves *et al.*, 2017). Observa-se, portanto, que os SAD são importantes ferramentas de gerenciamento de conflitos entre as partes interessadas, visto que subsidiam os processos decisórios e direcionam a implementação de políticas e ações no meio social (Ono, 2008).

Nesse contexto, identifica-se na literatura, a partir da década de 1990, o aumento progressivo do emprego de sistemas de apoio à decisão em problemas associados à gestão dos recursos hídricos, bem como de pesquisas empenhadas em desenvolver novas ferramentas computacionais para aprimorar o suporte à tomada de decisão nesse setor (Alves *et al.*, 2017; Andreu *et al.*, 1996; Azevedo *et al.*, 1998, 2000; Braga *et al.*, 1998; Herman *et al.*, 2014; Jamieson e Fedra, 1996; Loucks, 1995; Mysiak *et al.*, 2005; Nascimento, 2016; Ono, 2008; Trindade *et al.*, 2017, 2019, 2020; Zeff *et al.*, 2016), tendo em vista que muitos incorporam propriedades facilitadoras do desempenho de tarefas complexas inerentes ao processo de gestão e planejamento (Alves *et al.*, 2017).

No cenário internacional, encontram-se exemplos de utilização de diferentes SAD como ferramentas de simulação para subsidiar a gestão e o planejamento de recursos hídricos. Para fins de exemplificação, listam-se o WEAP (Sieber e Purkey, 2015), o IRAS (Matrosov *et al.*, 2011), o AQUATOOL (Andreu *et al.*, 1996), o MIKE BASIN (Jha e Gupta, 2003) e o RIVERWARE (Zagona *et al.*, 2001). No cenário nacional, destaca-se o emprego do SIGA (FUNCEME, 2018) e do ACQUANET (Roberto *et al.*, 2007).

A aplicação de tais softwares é reconhecida por proporcionar inúmeros benefícios e facilidades ao processo decisório. Todavia, algumas de suas limitações impõem restrições à abordagem criteriosa dos sistemas hídricos de abastecimento urbano, tendo em vista que estes são influenciados por uma série de fatores incertos. Dentre tais limitações, destaca-se o fato de que a grande maioria dos tradicionais softwares de simulação de sistemas hídricos: 1) baseia-se em abordagens determinísticas, que possibilitam a avaliação do comportamento dos sistemas hídricos sob alguns poucos cenários específicos e predefinidos, de modo a desconsiderar a influência de incertezas profundas; 2) não contempla mecanismos de feedbacks contínuos, responsáveis por periodicamente adicionar informações atualizadas ao modelo e desencadear adaptações às políticas adotadas à medida que a simulação avança; 3) não dispõe de algoritmos de otimização que os possibilitem identificar e avaliar o desempenho de um conjunto expressivo de alternativas (cursos de ação) e suas relações de troca; 4) carece de integração entre ações operacionais de curto prazo e medidas de ampliação da infraestrutura de oferta, implementadas a longo prazo; e 5) não dispõe de modelagem conjunta de balanço de massa e finanças.

Tais fatores motivaram a escolha do software de simulação estocástica WaterPaths para subsidiar a elaboração de portfólios de abastecimento de água no âmbito do Distrito Federal, objeto dessa pesquisa. Dentre suas principais vantagens, destaca-se o fato de essa plataforma: 1) possibilitar análises de ampla gama de incertezas por meio de simulações Monte Carlo, de modo a viabilizar a obtenção de soluções robustas, que apresentem bom desempenho sob os mais diversos e profundamente incertos cenários; 2) utilizar regras de decisão adaptativas, que respondem às mudanças das variáveis de incerteza ao longo do horizonte simulado; 3) combinar estratégias de gestão de curto prazo com investimentos de longo prazo em obras de infraestrutura; e 4) fornecer suporte computacional avançado para algoritmos de otimização multiobjetivo (Trindade *et al.*, 2020). As principais características e funcionalidades do WaterPaths são abordadas na seção a seguir. Caso o leitor tenha

interesse em obter maiores detalhes sobre o referido software de simulação, recomenda-se a leitura de Trindade (2019) e Trindade *et al.* (2020).

3.4 – WATERPATHS: UM SISTEMA DE SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA APLICADO À GESTÃO E AO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO NO CONTEXTO DE INCERTEZAS PROFUNDAS

O WaterPaths, desenvolvido na Universidade de Cornell (EUA) (Trindade, 2019; Trindade *et al.*, 2020), consiste em um software de simulação estocástica disponível para uso livre, cuja proposta consiste em coordenar, sob a perspectiva de riscos associados e de incertezas (bem-caracterizadas e profundas), os investimentos de longo prazo em infraestruturas de abastecimento urbano e as decisões operacionais de curto prazo das companhias de saneamento. Concebido com base na Programação Orientada ao Objeto, é possível adicionar novos recursos ao código para ajustá-lo às particularidades do estudo de caso retratado, conforme realizado nessa dissertação.

Além das incertezas relacionadas a extremos hidrológicos ou climáticos, o modelo engloba fatores-chave dos sistemas urbanos que também influenciam o processo de tomada de decisão, como o crescimento da demanda, a efetividade da aplicação de medidas de restrição de uso da água e oscilações econômicas. Aplicações recentes do WaterPaths tiveram como foco sistemas hídricos sob pressão de demandas crescentes associada à escassez de água ou secas cada vez mais severas (Trindade, 2019; Trindade *et al.*, 2020).

Centenas a milhares de cenários são simulados cada vez que o modelo é rodado para avaliar a performance de uma política específica. Os resultados das simulações são utilizados para calcular cinco funções objetivo, estabelecidas com o intuito de maximizar a confiabilidade do serviço de abastecimento e minimizar fatores negativos, como custos e oscilações financeiras. Tendo em vista que a simulação de centenas a milhares de cenários exige grande esforço computacional, estratégias de paralelização computacional foram implementadas no WaterPaths, a fim de reduzir o tempo de simulação e otimização (Trindade *et al.*, 2020).

As políticas simuladas constituem a base das tomadas de decisão associadas à gestão das secas, aos investimentos em infraestrutura e à sustentabilidade financeira da companhia. Tais decisões englobam medidas de curto e de longo prazo, cuja implementação, por parte do modelo, ocorre a partir de métricas baseadas no risco de falha (RdF) do sistema de

abastecimento. As medidas de curto prazo (restrição de uso da água, transferência de água tratada entre companhias e seguro contra secas) objetivam mitigar as secas e as oscilações financeiras. Quanto às medidas de longo prazo, estas implicam elevados e duradouros investimentos relacionados à ampliação da infraestrutura de abastecimento, como construção/expansão de reservatórios, implantação de sistemas de reuso direto, entre outras.

Ao ser acoplado a algoritmos de otimização, o WaterPaths fornece um conjunto de soluções próximas ao ótimo (Frente de Pareto) com os respectivos valores das funções objetivo otimizadas. De modo geral, essas soluções detalham, nos diversos cenários simulados, o sequenciamento dos investimentos realizados em novas infraestruturas (*pathways*) ao longo do horizonte de planejamento (Figura 3.6), bem como evidenciam a frequência de uso das medidas de restrição e de transferência de água. Os resultados fornecidos constituem, portanto, verdadeiros portfólios de abastecimento que visam assegurar a provisão de água à população por meio da adoção de políticas financeiramente sustentáveis.

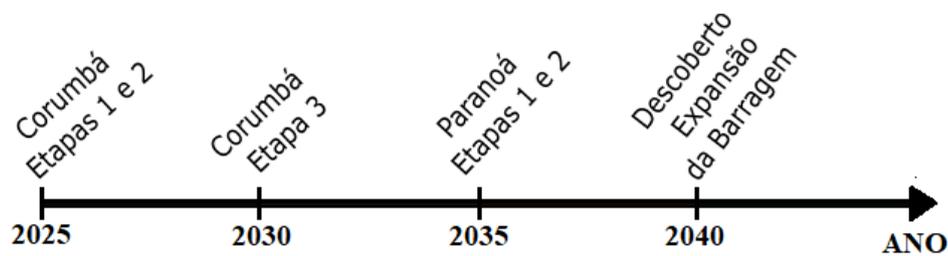


Figura 3.6 - Exemplo de sequenciamento das novas infraestruturas implantadas ao longo do horizonte simulado em um único cenário.

Na Figura 3.7, é demonstrado o fluxo principal de simulação do WaterPaths. Observa-se que toda a execução do modelo é governada pelas métricas de RdF de curto e de longo prazo, responsáveis por desencadear, respectivamente, os instrumentos de mitigação das secas (ações operacionais de curto prazo) e a construção/expansão de infraestruturas de abastecimento. Além disso, nota-se que as simulações são realizadas de acordo com o passo semanal. Essa escolha está associada à escala temporal de tomada de decisão por parte das companhias, sobretudo aquelas relacionadas à adoção de medidas de restrição de consumo e de transferências de água. Nos tópicos a seguir, serão detalhadas as principais características e funcionalidades do modelo evidenciadas no fluxograma da Figura 3.7.

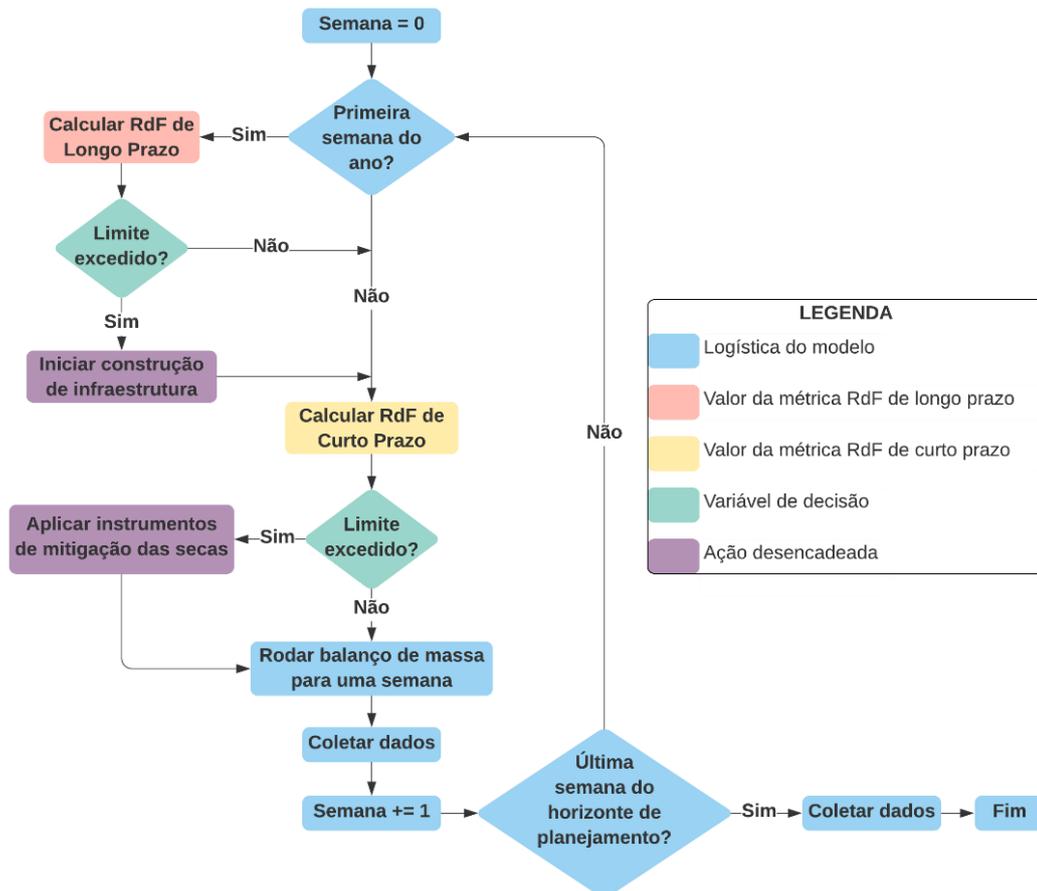


Figura 3.7 - Fluxo de simulação principal do WaterPaths.
 Fonte: Adaptado de Trindade (2019).

3.4.1 – Definição e cálculo das métricas de risco de falha (RdF) de curto e de longo prazo

As regras de decisão baseadas nas métricas de Risco de Falha constituem as principais variáveis de decisão do problema, visto que são responsáveis por acionar a implementação das diferentes alternativas do portfólio de abastecimento de água quando o RdF calculado excede os respectivos valores limites otimizados (Trindade, 2019).

Cada medida de curto prazo a ser implementada para mitigar os efeitos de secas (restrição, transferência e pagamento de seguro) tem um correspondente RdF limite que, quando ultrapassado, determina o uso imediato de um instrumento em particular. Por exemplo, se em uma dada semana o RdF ultrapassar o limite estabelecido no plano de racionamento, este será recomendado à companhia de saneamento. Na prática, os tomadores de decisão discutiriam, baseado no valor do RdF e em outros fatores, se a adoção dessa medida é razoável, mas o WaterPaths assume que estes seguirão o plano e implementarão as medidas

de curto e de longo prazo assim que o valor da métrica de RdF ultrapassar o respectivo valor limite.

O primeiro passo para o cálculo do RdF de curto prazo consiste em rodar 50 simulações de 52 semanas (um ano) de duração (Figura 3.8), partindo das condições do sistema correspondentes à semana para a qual o RdF está sendo calculado. Cada uma das 50 simulações é rodada com os dados hidrológicos (séries de vazão e de taxas de evaporação) de um dos 50 anos anteriores àquela semana e com dados de demanda do ano anterior. O valor do RdF atribuído à companhia de saneamento é calculado como o número de simulações (dentre as 50 simulações de um ano) nas quais o volume total armazenado nos reservatórios utilizados pela companhia atinge valores abaixo de 20% da capacidade total em pelo menos uma semana do período simulado (Figura 3.8).

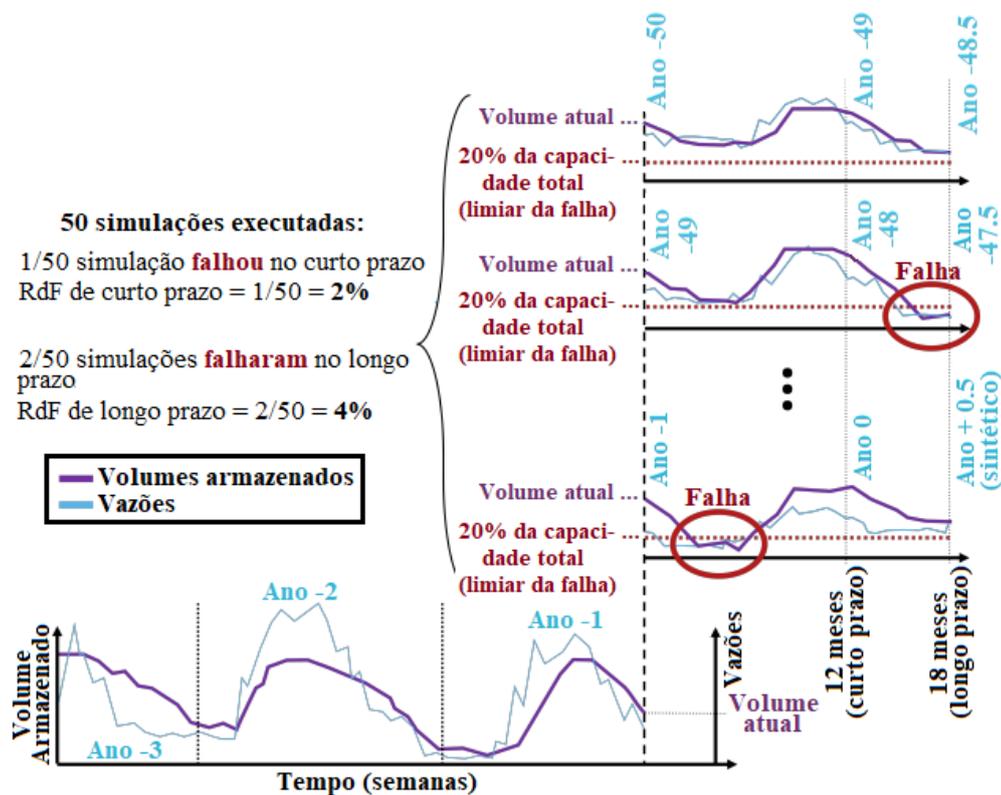


Figura 3.8 - Funcionamento da métrica de risco de falha (RdF) de curto e de longo prazo.

Fonte: Adaptado de Trindade (2019).

Por outro lado, a construção de nova infraestrutura é regulada por uma métrica de RdF de longo prazo, na qual a duração das 50 simulações é de 78 semanas (um ano e meio) para fins de captura de anos secos consecutivos, em que os reservatórios não são preenchidos durante a estação chuvosa (Figura 3.8). Esses cálculos são feitos na primeira semana do ano (Figura 3.7) e, quando o limiar do RdF de longo prazo é excedido, a construção de nova

infraestrutura é acionada (Figura 3.8). Após o término do período de construção, que varia aleatoriamente ao longo de uma distribuição uniforme de 3 a 5 anos (devido à incerteza associada ao tempo de construção), a capacidade associada à nova infraestrutura é incorporada ao modelo global de balanço hídrico (Trindade *et al.*, 2020; Zeff *et al.*, 2016).

Os cálculos de RdF de longo prazo incorporam a capacidade associada à nova infraestrutura assim que esta é acionada, ou seja, antes do final do período de construção, de modo que futuras decisões de ampliação da infraestrutura reflitam todo o desenvolvimento em andamento. O RdF de curto prazo, no entanto, somente incorpora a capacidade adicional resultante da nova infraestrutura quando a mesma estiver disponível para atender as demandas, conforme se observa na Figura 3.9. Assim, as decisões de ampliação da infraestrutura de oferta afetam os gatilhos utilizados tanto para as futuras tomadas de decisão de curto prazo quanto de longo prazo (Trindade *et al.*, 2020; Zeff *et al.*, 2016).

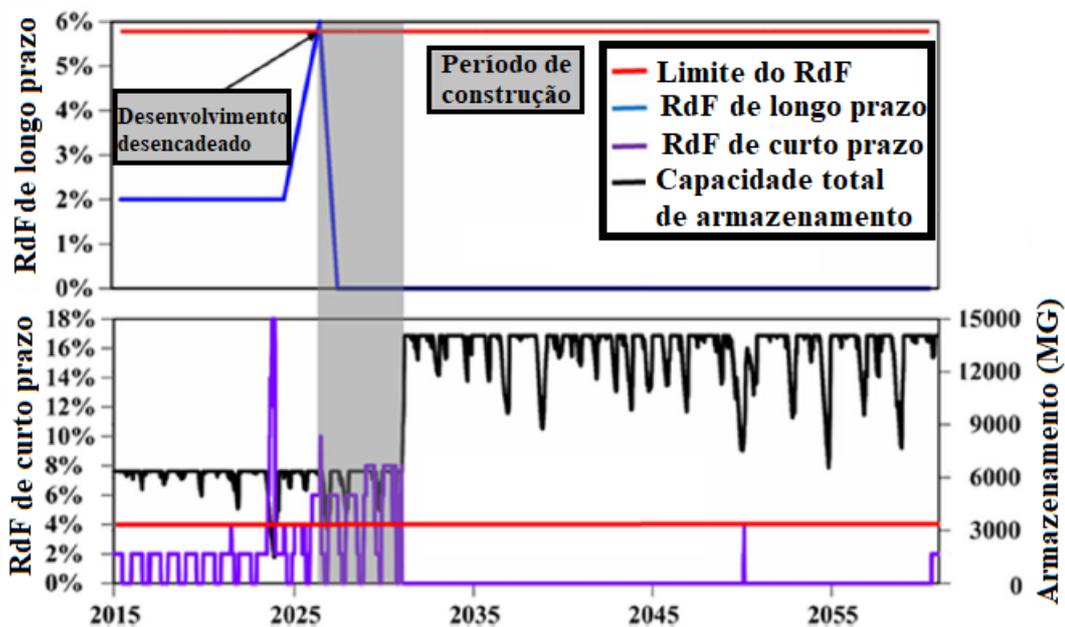


Figura 3.9 - Relação entre o planejamento de infraestrutura de longo prazo e ações operacionais de curto prazo.

O valor limite da métrica de RdF de longo prazo é excedido, de modo a desencadear a construção de nova infraestrutura que, por sua vez, aumenta o volume de água disponível no sistema e causa uma redução de longo prazo nas medidas de RdF semanais (curto prazo).

Fonte: Zeff *et al.* (2016).

As métricas de RdF de curto e de longo prazo, representadas pela variável $x_{rdf,j}^w$, são calculadas de acordo com as Equações 3.1 a 3.3, apresentadas a seguir (Trindade, 2019):

$$x_{rdf,j}^w = \frac{1}{N_{RdF}} \sum_{y'=1}^{N_{RdF}} f_{y',j}^w(Q^{y'}, E^{y'}) \quad (\text{Equação 3.1})$$

Em que:

$$f_{y',j}^w = \begin{cases} 0, & \forall w' \in \{(y', w), \dots, (y', w + T_{RdF})\} : \frac{x_{s',j}^{y',w'}}{C_j} \geq S_c \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{Equação 3.2})$$

E:

$$x_{s',j}^{y',w'} = f(C_j, DI_j^w, Q_j^{y',w'}, E_j^{y',w'}, Qv_j^{y',w'} | \Psi_{IP}) \quad (\text{Equação 3.3})$$

Nas Equações 3.1 a 3.3, w' e y' correspondem, respectivamente, à semana e ao ano simulado com dados do passado para o cálculo do risco de falha. A variável $x_{rdf,j}^w$ representa o RdF para a companhia j na semana atual w , enquanto $f_{y',j}^w$ é uma variável binária, de modo que 1 denota a ocorrência de uma falha durante a correspondente simulação do RdF com dados de anos anteriores y' . $Q^{y'}$, $E^{y'}$ e $Qv^{y'}$ representam, respectivamente, as séries históricas de vazão afluyente, de taxas de evaporação e de vazão vertida no ano y' anterior à semana w utilizadas em uma das N_{RdF} simulações ($N_{RdF} = 50$). A variável T_{RdF} corresponde a 52 semanas, no caso do cálculo do RdF de curto prazo, e 78 semanas, para o RdF de longo prazo. A falha do sistema ocorre quando a razão entre o volume total armazenado $x_{s',j}^{y',w'}$ (em qualquer semana w' de um determinado ano y') e a capacidade máxima de armazenamento C_j (somatório da capacidade de armazenamento de todas as infraestruturas hídricas utilizadas pela companhia j) atinge valores inferiores ao volume crítico S_c (atualmente, $S_c = 0,2 * C_j$). A variável $x_{s',j}^{y',w'}$ corresponde ao vetor de estados do volume disponível, calculado em cada uma das simulações do RdF por meio de registros hidrológicos de anos anteriores y' . Nos cálculos de $x_{s',j}^{y',w'}$, DI_j^w representa a demanda irrestrita (ou seja, sem acionamento de restrições ou transferências) da companhia j na semana w , e Ψ_{IP} é a matriz com as amostras dos fatores de incerteza profunda.

É importante destacar que, durante o curso da simulação, novas informações são incorporadas aos cálculos de risco, visto que as séries temporais sintéticas de vazão e de

evaporação são gradualmente adicionadas ao registro histórico, as projeções de demanda são atualizadas e as capacidades de atendimento se alteram devido às decisões de ampliação de infraestrutura acionadas dinamicamente pelo modelo (Palmer e Characklis, 2009; Trindade *et al.*, 2019, 2020; Zeff *et al.*, 2016). Dessa forma, as regras de decisão baseadas no cálculo do risco de falha do sistema possibilitam que o processo de tomada de decisão por parte do modelo seja adaptativo ao longo do horizonte simulado, visto que tais métricas continuamente respondem às mudanças das variáveis de incerteza.

Por fim, tem-se que o cálculo da métrica de RdF é dependente do balanço de massa realizado pelo WaterPaths, o qual será descrito no tópico a seguir.

3.4.2 – Balanço de massa do modelo

Segundo Trindade (2019), o sistema WaterPaths efetua o balanço de massa sobre todas as infraestruturas de oferta de água que compõem a análise (reservatórios, captações fio d'água, etc), respeitando o fluxo de montante para jusante, o qual é estabelecido por meio das informações de conectividade fornecidas pelo usuário. O balanço de massa efetuado sobre cada reservatório é demonstrado na Equação 3.4:

$$x_s^{w+1} = x_s^w + Q^w + Ef^w + Qrm^w - E^w \cdot AR(x_s^w) - Qr^w - Dr^w - Qv^w \quad (\text{Equação 3.4})$$

onde x_s^{w+1} corresponde ao volume de água armazenado no reservatório na semana $w + 1$, (posterior à semana atual w), Q é vazão natural afluyente ao reservatório, Ef corresponde aos efluentes lançados nos tributários ou diretamente no reservatório, Qrm é a vazão descarregada por outro reservatório à montante (vazão obrigatória + vazão vertida), caso este exista, E corresponde à taxa de evaporação, AR corresponde à área do reservatório como função do volume armazenado (x_s^w), Qr é a vazão remanescente, Dr corresponde à demanda urbana associada ao reservatório e Qv é a vazão vertida, cujo valor será zero, a menos que o reservatório esteja completamente cheio.

Caso um reservatório seja alocado para usos múltiplos (abastecimento, manutenção da qualidade ambiental, etc), tem-se que a vazão afluyente é distribuída para cada uso de modo proporcional aos respectivos volumes alocados, os quais são definidos como um percentual da capacidade total de armazenamento do reservatório.

Cabe destacar que o modelo também contempla outras infraestruturas de oferta de água, como captações fio d'água e estações de reuso. As demandas das companhias são atendidas pelos diversos tipos de infraestrutura, de acordo com o volume disponível em cada uma, sendo que os reservatórios são os últimos a serem utilizados para tal fim.

3.4.3 – Instrumentos de mitigação de secas e instrumentos financeiros

O modelo atualmente possui dois instrumentos de mitigação dos efeitos das secas: restrição de uso da água e transferência de água tratada entre companhias. Tais instrumentos, cujo acionamento é governado pela métrica de RdF de curto prazo, são importantes para assegurar a continuidade do serviço de abastecimento. Contudo, sua implementação pode comprometer o equilíbrio financeiro das companhias, visto que a redução de consumo decorrente da restrição de uso da água diminui a receita arrecadada. Além disso, transferências de água de um sistema para o outro demandam custos, os quais geralmente não estão previstos no orçamento disponível. A adoção de instrumentos financeiros, portanto, é considerada uma medida importante a ser implementada pelas companhias, a fim de absorver tais custos e proteger suas finanças frente à ocorrência de secas.

Nesse contexto, o modelo possibilita o uso de seguros contra secas (não utilizados nessa pesquisa) e de fundos de contingência. O primeiro é acionado como uma porcentagem da receita do ano anterior sempre que o RdF de curto prazo atingir o respectivo valor limite. Quanto ao segundo, este independe dos cálculos da métrica RdF. Na última semana de cada ano, as companhias depositam no fundo de contingência uma porcentagem fixa de sua receita anual, de modo que o valor poupado no presente ano será utilizado durante os anos seguintes para custear os instrumentos de mitigação das secas e, possivelmente, a construção de novas infraestruturas.

Enquanto os seguros contra secas são efetuados por meio de contratos com seguradoras e garantem cobertura durante eventos de seca, os fundos de contingência funcionam como uma poupança anual da companhia, a qual pode ser utilizada para amenizar instabilidades financeiras decorrentes de diferentes causas. A ideia de combinar os seguros com os fundos próprios está associada à dificuldade de se manter grandes fundos de contingência, capazes de cobrir todas as despesas ocasionadas por secas muito severas, além do risco de o montante não utilizado ser apropriado por governos locais para usos não relacionados à água (Zeff *et*

al., 2014, 2016). Mais detalhes sobre o funcionamento desses instrumentos financeiros podem ser obtidos em Zeff e Characklis (2013) e Trindade (2019).

3.4.4 – Investimentos em ampliação da infraestrutura de oferta de água

As ações operacionais de curto prazo (restrições e transferências) são estratégias fundamentais no contexto dos portfólios de abastecimento de água, visto que possibilitam manter o fornecimento de água à população e retardar a necessidade de elevados investimentos em infraestrutura (Trindade *et al.*, 2017, 2019; Zeff *et al.*, 2016). Todavia, as crescentes demandas urbanas e incertezas associadas às condições climáticas apontam continuamente para a necessidade de se ampliar a infraestrutura de oferta, a fim de assegurar confiabilidade e resiliência aos sistemas de abastecimento (Shafer e Fox, 2017).

No modelo, a ampliação da infraestrutura de abastecimento (governada pelo RdF de longo prazo) compreende projetos totalmente novos, como implantação de novos reservatórios, captações fio d'água, estações de reuso de água e estações de tratamento (ETA), bem como projetos de expansão de infraestruturas já existentes, como ampliação da capacidade de armazenamento dos reservatórios e da vazão tratada nas ETAs (Trindade, 2019).

Para possibilitar a construção de infraestrutura ao longo do período de planejamento, o modelo depende da inserção de uma série de dados (vazão afluyente, capacidade de armazenamento, entre outras) referentes a cada uma das opções de infraestrutura que integram o portfólio da companhia. Quanto à sequência de construção, esta pode ser definida pelo próprio usuário ou por algum algoritmo de otimização. A primeira situação se aplica quando o usuário define previamente as políticas específicas que serão simuladas no WaterPaths. Nesse caso, o próprio usuário determina os valores das variáveis de decisão, as quais constituem as políticas de abastecimento. A segunda situação, por outro lado, ocorre quando o usuário atribui ao otimizador acoplado ao WaterPaths a tarefa de determinar os conjuntos de valores das variáveis de decisão, ou seja, de gerar as políticas e retornar aquelas que apresentarem as melhores performances (soluções não dominadas). Maiores detalhes sobre o processo de otimização são fornecidos no item 3.4.7.

Tendo em vista que projetos de infraestrutura são frequentemente financiados ao longo de décadas, o modelo possibilita a aquisição de empréstimos a uma taxa de juros fixa ou variável, bem como empréstimos do tipo balão. Cada uma dessas opções resulta em diferentes formas de liquidação da dívida, com valores presentes líquidos distintos. Desse

modo, o usuário escolhe o tipo de empréstimo mais adequado à origem dos recursos que subsidiarão a implantação de cada projeto de infraestrutura.

No tópico a seguir, será abordada a implementação dos fatores de incerteza nas simulações do sistema WaterPaths, aspecto chave de sua concepção e responsável por influenciar os investimentos em infraestruturas de oferta e a implementação das ações operacionais de curto prazo.

3.4.5 – Representação e avaliação das incertezas

A grande maioria dos atuais softwares de simulação de recursos hídricos não incorpora a avaliação de incertezas e suas implicações sobre as políticas a serem adotadas, visto que simulam a performance dos sistemas hídricos sob condições de um cenário já preestabelecido, composto geralmente por uma única série temporal de vazão afluente, de taxas de evaporação e de demanda, bem como de valores únicos para os demais fatores de incerteza (quando estes são considerados) (Trindade, 2019). O WaterPaths, por outro lado, atribui às incertezas um tratamento estocástico por meio da simulação de centenas a milhares de cenários e dispõe da possibilidade de ser acoplado a algoritmos de otimização, a fim de que as melhores soluções sejam identificadas.

Para realizar as simulações, o WaterPaths requer, minimamente, a inserção dos seguintes dados para cada cenário a ser simulado: uma série temporal de vazão e de taxas de evaporação referentes a cada infraestrutura de oferta de água, bem como uma série de demanda associada a cada companhia. Quanto aos fatores de incerteza profunda atualmente implementados no modelo (Tabela 3.1), o usuário tem a opção de fornecer séries de multiplicadores escalares; caso tais séries não sejam fornecidas, serão assumidos os respectivos valores padrões inseridos pelo usuário. Cabe destacar que todas as séries temporais e todos os multiplicadores escalares devem ser produzidos externamente, por meio de qualquer método/distribuição estatística desejada, para posteriormente serem inseridos no modelo como dados de entrada.

Tabela 3.1 - Fatores de incerteza profunda implementados no WaterPaths.

Incertezas do tipo "regional" indicam que o mesmo valor será atribuído para todas as companhias, ao passo que a incerteza do tipo "individual" permite a atribuição de valores distintos para cada companhia.

Fonte: Trindade (2019).

Tipo	Fator de Incerteza Profunda	Regional ou Individual para Companhia / Infraestrutura
Demanda / Abastecimento	Crescimento da demanda anual média	Regional
	Crescimento da evaporação anual média	Regional
Aspectos Econômicos	Taxa de juros	Regional
	Período de amortização	Regional
	Taxa de desconto	Regional
Efetividade de Políticas	Eficácia dos estágios de restrição de uso da água	Individual
Construção de Infraestrutura	Prazo para obtenção da licença	Individual
	Custo de construção	Individual

3.4.6 – Funções objetivo implementadas no WaterPaths

O modelo possui cinco funções objetivo implementadas: Confiabilidade do Fornecimento (f_{CONF}), Frequência de Restrição (f_{FR}), Valor Presente Líquido do Custo de Infraestrutura (f_{IVPL}), Custo Anual Médio (f_{CAM}) e Custo do Pior Primeiro Percentil (f_{CPPP}). Todas as cinco funções objetivo são calculadas a partir da simulação de centenas a milhares de cenários. No caso da presente pesquisa, 1.000 cenários (*states of the world*) foram adotados. As equações e maiores explicações sobre as cinco funções objetivo são apresentadas nos itens a seguir (3.4.6.1 a 3.4.6.5).

3.4.6.1 – Confiabilidade do fornecimento (f_{CONF})

Essa função objetivo (Equação 3.5) mensura a confiabilidade do sistema de abastecimento, calculada como a fração de cenários em que o volume armazenado nos reservatórios utilizados pela companhia mantém-se superior a 20% da capacidade máxima do sistema em todas as semanas do horizonte simulado (abaixo desse valor, o sistema registra como falha) (Trindade, 2019). Desse modo, a função de confiabilidade avalia a capacidade de determinada política atender à demanda de água no espectro de cenários simulados.

$$\max f_{CONF} = \min_j \left[\min_y \left(\frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} g_{i,j}^y \right) \right] \quad (\text{Equação 3.5})$$

De modo que:

$$g_{i,j}^y = \begin{cases} 0, & \forall w : x_{s,i,j}^{w,y} \geq 0,2 * C_j \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{Equação 3.6})$$

Onde:

- $g_{i,j}^y = 1$, se houve alguma semana w em determinado ano y de um cenário particular i em que a capacidade combinada dos reservatórios atingiu valores abaixo de 20% da capacidade máxima de armazenamento C_j , ou 0, caso contrário;
- $x_{s,i,j}^{w,y}$ = vetor de estados (ou níveis) do volume total armazenado em cada semana w ;
- N_r = número de cenários avaliados em uma simulação (1.000, nessa pesquisa);
- y = ano da simulação;
- i = índice do cenário da simulação; e
- j = índice da companhia.

3.4.6.2 – Frequência de restrição (f_{FR})

As companhias de saneamento também precisam avaliar a frequência com que as soluções apresentadas fizeram uso das restrições temporárias de uso da água. Essa avaliação é realizada para possibilitar que a companhia minimize os danos aos consumidores e evite a imposição contínua dessa medida, dada a sua impopularidade (Zeff *et al.*, 2016). Portanto, a função objetivo de Frequência de Restrição (Equação 3.7) representa a fração dos anos, ao longo do horizonte de planejamento, na qual medidas de restrição de uso da água foram implementadas em ao menos uma semana.

$$\min f_{FR} = \max_j \left[\frac{1}{N_{ys} \cdot N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_{ys}} h_{i,j}^y \right] \quad (\text{Equação 3.7})$$

Onde:

- N_{ys} = número de anos do horizonte de planejamento (40, nessa pesquisa); e
- $h_{i,j}^y = \begin{cases} 0, & \forall w : x_{rdfCP,i,j}^{y,w} \leq \theta_{gr,j} \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{Equação 3.8})$

Em que:

- $x_{rdfCP,i,j}^{y,w}$ corresponde ao valor do RdF de curto prazo da companhia j calculado na semana w do ano y referente ao cenário de simulação i ;
- $h_{i,j}^y = 1$, se houve alguma semana em determinado ano y de um cenário particular i na qual restrições de uso da água foram acionadas, ou 0, caso contrário; e
- $\theta_{gr,j}$ = vetor de gatilho (limiar), referente à companhia j , para implementação de restrição de uso da água.

3.4.6.3 – Valor presente líquido do custo de infraestrutura (f_{IVPL})

As companhias de saneamento normalmente realizam obras de infraestrutura a partir da aquisição de grandes empréstimos, os quais são liquidados a longo prazo. Essa função objetivo representa, portanto, a média do valor presente líquido das infraestruturas construídas pela companhia ao longo de todos os cenários simulados, calculada de acordo com a Equação 3.9 (Trindade, 2019).

$$\min f_{IVPL} = \max_j \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{PA} \frac{PMT}{(1 + TD)^y} \quad (\text{Equação 3.9})$$

Onde:

- PA = período de amortização;
- TD = taxa de desconto;
- y = ano em que cada parcela do empréstimo PMT é liquidada (a partir da data em que o recurso é concedido), sendo PMT calculado por meio da Equação 3.10:

$$PMT = \frac{VP [TJ(1 + TJ)^{PA}]}{[(1 + TJ)^{PA} - 1]} \quad (\text{Equação 3.10})$$

Em que:

- VP = valor do principal (custo do projeto); e
- TJ = taxa de juros.

3.4.6.4 – Custo anual médio (f_{CAM})

Essa função objetivo (Equação 3.11) reflete como a implantação de infraestruturas e de ações operacionais de curto prazo afetam os orçamentos anuais das companhias. Desse modo, essa função abrange os gastos relacionados ao pagamento das parcelas dos empréstimos obtidos para a construção de novas infraestruturas, bem como os custos associados à manutenção dos instrumentos financeiros utilizados (fundo de contingência e contratos de seguro) para mitigar os impactos negativos decorrentes das restrições de uso da água e das transferências de água realizadas (Trindade *et al.*, 2019; Zeff *et al.*, 2016). Tem-se, portanto, que o valor dessa função objetivo corresponde à média, entre todos os anos dos cenários simulados (Equação 3.11), dos custos anuais da companhia (CAC), calculados como uma porcentagem da receita anual total (RAT) (Equação 3.12).

$$\min f_{CF} = \max_j \left[\frac{1}{N_{ys} \cdot N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{y=1}^{N_{ys}} CAC_{i,j}^y \right] \quad (\text{Equação 3.11})$$

De modo que:

$$CAC_{i,j}^y = \frac{\sum_{c \in C_j} PMT_{i,j,c} + CCS_{i,j}^y + (\theta_{caf,c,j} * RAT_{i,j}^y) + (PR_{i,j}^y + CT_{i,j}^y - CS_{i,j}^y - FC_{i,j}^y, 0)}{RAT_{i,j}^y} \quad (\text{Equação 3.12})$$

Onde:

- CAC = custo anual da companhia;
- $PMT_{i,j,c}$ = parcela do empréstimo (R\$) correspondente à infraestrutura c construída no cenário i e pertencente ao conjunto C_j de opções de infraestruturas a serem implantadas pela companhia j ;
- CCS = custo do contrato de seguro (R\$);
- $\theta_{caf,c,j}$ = vetor correspondente ao percentual das contribuições anuais destinadas ao fundo de contingência da companhia j ;
- RAT = receita anual total (R\$);
- PR = perdas de receita decorrentes da adoção de restrições de uso da água (R\$);
- CT = custo de transferência de água (R\$);
- CS = cobertura do seguro (R\$); e
- FC = quantia disponível no fundo de contingência (R\$).

Desse modo, esse objetivo reflete como as medidas de curto e longo prazo afetarão os orçamentos das companhias, o que pode ter implicações maiores sobre as suas decisões do que o valor presente líquido (Zeff *et al.*, 2016).

Ressalta-se, desde já, que os mecanismos relacionados aos contratos com seguradoras não foram considerados nessa pesquisa, visto que inexistente registro histórico e previsão normativa acerca da aplicação desse instrumento à realidade do estudo de caso dessa pesquisa. Desse modo, os termos $CCS_{i,j}^y$ e $CS_{i,j}^y$ da Equação 3.12 equivalem a zero. Os fundos de contingência, por sua vez, independem da realização de contratos com terceiros, pois são mantidos pelas próprias companhias de saneamento. O gerenciamento desse instrumento é, portanto, mais simples e flexível. Nesse sentido, tal instrumento financeiro foi explorado nessa pesquisa, tendo em vista que este se apresenta como uma forma de custear despesas emergenciais relacionadas à mitigação das secas, favorecendo a manutenção da sustentabilidade financeira das companhias.

3.4.6.5 – Custo do pior primeiro percentil (f_{CPPP})

Tendo em vista que as perdas de receita decorrentes da aplicação de restrições de uso da água e os custos adicionais relacionados às transferências de água tornam a sustentabilidade financeira das companhias vulnerável (Zeff *et al.*, 2016), o modelo emprega essa função objetivo (Equação 3.13), que quantifica o grau de variabilidade das receitas e das despesas anuais das companhias, bem como os efeitos dos instrumentos de mitigação financeira (fundos de contingência e contratos de seguro) sobre essa variabilidade. Desse modo, esse objetivo minimiza o pior primeiro percentil dos custos anuais de gestão das secas (restrições e transferências de água) observados entre todos os cenários simulados ao longo do horizonte de planejamento (Trindade, 2019). Dessas perdas financeiras, são descontados os efeitos dos instrumentos de mitigação financeira (Equação 3.14), de modo a considerar apenas os valores que excedem o fundo de contingência disponível e a cobertura dos seguros. Essa medição é importante, visto que as companhias têm bastante dificuldade de gerir elevadas oscilações de receita e/ou despesas, as quais afetam seu respectivo equilíbrio econômico-financeiro.

$$\min f_{CPPP} = \max_j \left\{ \text{quantil}(CAC_{i,j}, 0.99) \right\}_{i \in N_r} \quad (\text{Equação 3.13})$$

De modo que:

$$CAC_{i,j} = \max_y \frac{(PR_{i,j}^y + CT_{i,j}^y - FC_{i,j}^y - CS_{i,j}^y, 0)}{RAT_{i,j}^y} \quad (\text{Equação 3.14})$$

Os termos da Equação 3.14 foram explicados na Equação 3.12. Observa-se que $CS_{i,j}^y$ equivale a zero, conforme justificado no item 3.4.6.4.

Dada a grande diversidade e quantidade de políticas de abastecimento que podem ser avaliadas com o WaterPaths, é possível acoplá-lo a algoritmos de otimização para fins de exploração do espaço de possíveis caminhos e quantificação das melhores relações de troca (*tradeoffs*) que emergem entre as funções objetivo descritas acima (Zeff *et al.*, 2016). Desse modo, no tópico a seguir, serão abordadas importantes estratégias de otimização, as quais propiciam a identificação das soluções que mais se aproximam da verdadeira Frente de Pareto (conjunto de soluções ótimas).

3.4.7 – Processo de otimização acoplado ao WaterPaths: análise multiobjetivo por meio de algoritmos evolucionários

A análise multiobjetivo busca identificar soluções que representem, globalmente, as melhores relações de troca entre os objetivos (Srinivas e Deb, 1994). Tais soluções se aproximam da real Frente de Pareto e são designadas como “não dominadas” (Figura 3.10), visto que nenhum de seus objetivos pode ser melhorado sem que algum outro seja deteriorado. Conforme se observa na Figura 3.10, apenas as soluções A e B constituem a Frente de Pareto, dado que C é dominada por ambas as soluções. As relações de dominância ε_1 e ε_2 , por sua vez, são utilizadas para manter o tamanho do conjunto de Pareto razoavelmente pequeno. A finalidade disso consiste em prevenir que soluções não dominadas por uma fração insignificante do valor de um objetivo sejam incluídas nesse conjunto (Laumanns *et al.*, 2002). Desse modo, as soluções são dispostas em uma malha como a da Figura 3.10, na qual verificam-se suas relações de dominância para cada função objetivo i , de acordo com as respectivas tolerâncias ε_i definidas (Laumanns *et al.*, 2002).

Dentre os métodos comumente utilizados na análise multiobjetivo, os algoritmos evolucionários se destacam, pois são capazes de elucidar problemas complexos, dificilmente solucionados por técnicas convencionais, como programação linear e não-linear. (Schar Dong, 2011).

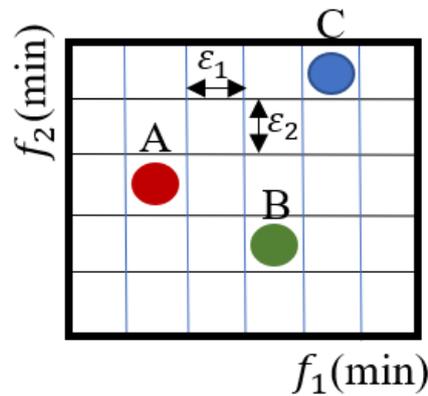


Figura 3.10 - Exemplo de soluções não dominadas ("A" e "B") em um problema de minimização com dois objetivos.

Nesse contexto, os algoritmos evolucionários multiobjetivo têm sido vastamente utilizados nas últimas duas décadas para solucionar os mais diversos desafios relacionados aos recursos hídricos, os quais são caracterizados por propriedades de não-linearidade, estocasticidade e incertezas (Reed *et al.*, 2013). Estudos relacionados ao planejamento e à gestão de sistemas de abastecimento de água (Borgomeo *et al.*, 2018; Characklis *et al.*, 2006; Kasprzyk e Reed, 2009; Trindade *et al.*, 2017, 2019; Zeff *et al.*, 2016) são alguns exemplos de aplicação desses algoritmos no âmbito dos recursos hídricos.

Atualmente, o sistema de simulação WaterPaths está integrado ao Borg Master-Worker (Hadka e Reed, 2013, 2014), um algoritmo evolucionário de otimização multiobjetivo. Sua estrutura de otimização emprega três recursos principais (Hadka e Reed, 2014): a relação de ϵ -dominância (Laumanns *et al.*, 2002), que define a precisão de cada função objetivo e garante convergência e diversidade de soluções (Zeff *et al.*, 2014); ϵ -progresso, mecanismo de reinicialização do algoritmo no caso de estagnação do processo de busca; e, por fim, operadores de recombinação autoadaptativos, cuja probabilidade de seleção é atualizada continuamente, de acordo com a respectiva performance apresentada em cada iteração (Hadka e Reed, 2013). Como resultado, o algoritmo de Borg é capaz de selecionar os operadores mais apropriados e demonstra desempenho superior em problemas de otimização difíceis (Reed *et al.*, 2013).

Na Figura 3.11, é apresentado o mecanismo principal de funcionamento do Borg. Inicialmente, um conjunto de soluções (políticas de abastecimento, no caso desse estudo) é gerado aleatoriamente e armazenado na classe denominada de “população” (bloco superior à esquerda). Em seguida, um dos seis operadores de recombinação (elipses tracejadas) é selecionado com base em suas performances anteriores, de modo que probabilidades maiores

de seleção são assinaladas àqueles que tiverem produzido maior número de soluções não dominadas (Hadka e Reed, 2013, 2014). O operador selecionado produzirá então uma solução-filho a partir de soluções-pai contidas no bloco da *população* e, possivelmente, no *arquivo* (bloco superior à direita). A solução-filho é então avaliada por um modelo (WaterPaths, nessa pesquisa) para potencialmente ser incluída na *população* e/ou *arquivo*, de modo a encerrar o ciclo, o qual é repetido inúmeras vezes. As soluções não dominadas são mantidas na classe “Arquivo”.

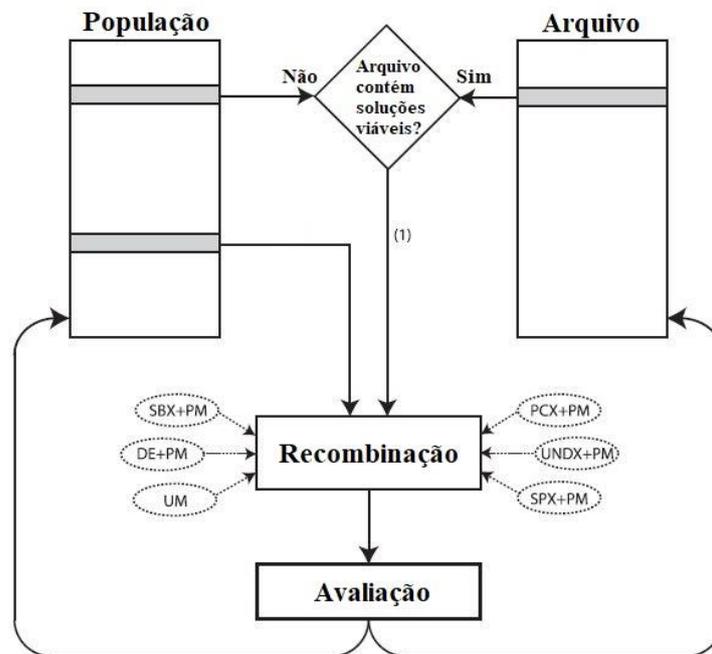


Figura 3.11 - Mecanismo de funcionamento do algoritmo evolucionário multiobjetivo Borg.

Fonte: Hadka e Reed (2014).

O algoritmo de Borg foi inicialmente desenvolvido para operar em série, de modo que cada simulação (composta por centenas a milhares de cenários) era realizada sequencialmente para cada solução contida na *população* (Hadka e Reed, 2013, 2014). Contudo, sua aplicação em problemas muito complexos e de larga escala mostrou-se inviável, pois o tempo demandado para completar a otimização era impraticável (Hadka e Reed, 2014).

A fim de melhorar a performance do algoritmo e tornar factível sua aplicação em problemas que exigem grande esforço computacional, estratégias de paralelização foram desenvolvidas, dando origem a duas versões distintas do Borg (Hadka e Reed, 2014): Master-Worker¹ (Borg MS) e Multi-Master (Borg MM). A primeira e mais simplista versão

¹ A denominação original da versão Master-Worker do algoritmo de otimização Borg (Hadka *et al.*, 2012; Hadka e Reed, 2013, 2014) era Master-Slave, cuja abreviação consiste em Borg MS. Todavia, adotou-se nessa

(utilizada nessa pesquisa) possibilitou a execução de simulações em paralelo (Figura 3.12a), ao passo que a versão Borg MM viabilizou a operação conjunta de duas ou mais instâncias da versão Borg MS (Figura 3.12b), alcançando grande eficiência de escalabilidade.

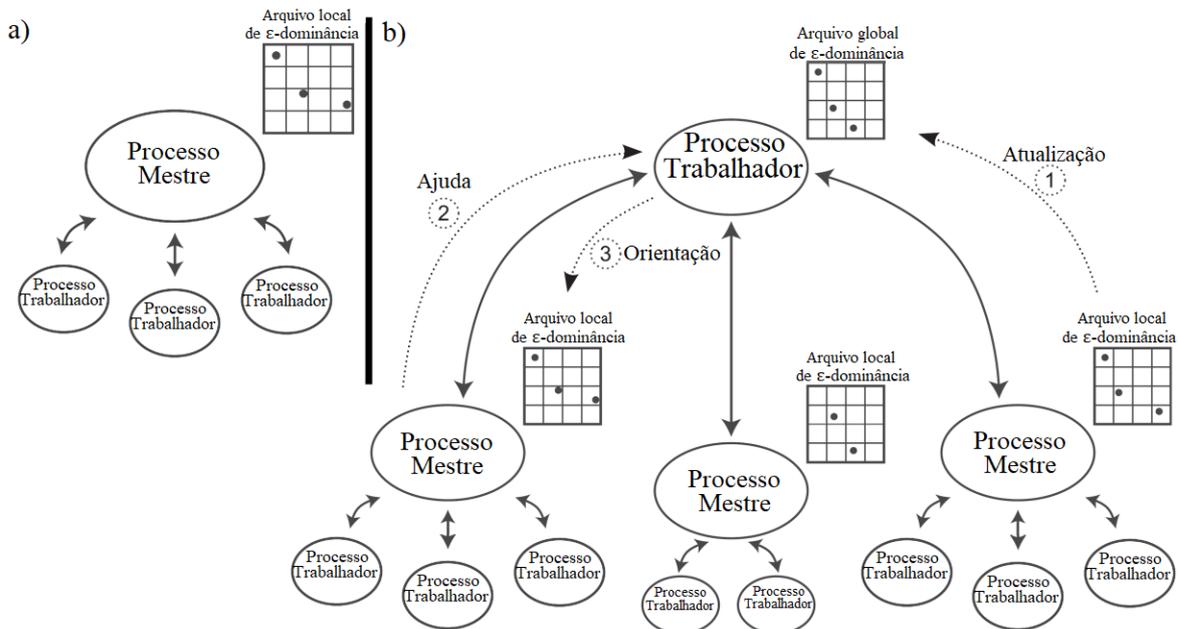


Figura 3.12 - Estratégias de Paralelização do algoritmo Borg: a) versão Master-Worker (Borg MS); e b) versão Multi-Master (Borg MM).

Fonte: Hadka e Reed (2014).

Na versão Borg MS (Figura 3.12a), as variáveis de decisão geradas pelos seis diferentes operadores implementados no processo mestre são transmitidas aos processos trabalhadores, os quais retornam ao processo mestre os respectivos valores das funções objetivo. O arquivo de ϵ -dominância é mantido e atualizado pelo processo mestre. Já na versão Borg MM (Figura 3.12b), executam-se duas ou mais instâncias do Borg MS (nessa figura, são apresentadas três instâncias), de modo que em (1), cada processo mestre transmite ao controlador global seu arquivo local de ϵ -dominância; em (2), o processo mestre encaminha uma solicitação de “ajuda” ao controlador global quando tem dificuldades de se aproximar de sua Frente de Pareto; e em (3), o controlador retorna ao processo mestre as informações necessárias, as quais incluem os dados referentes ao arquivo global de ϵ -dominância e às probabilidades globais dos operadores. Maiores detalhes sobre o algoritmo de Borg podem ser obtidos em Hadka *et al.* (2012), Hadka e Reed (2013, 2014).

pesquisa a designação Master-Worker, utilizada pelos trabalhos mais recentes (Trindade *et al.*, 2019, 2020), e manteve-se a abreviação original de Borg MS.

No caso dessa pesquisa, cada política de abastecimento urbano gerada pelo otimizador Borg MS é simulada sob 1.000 cenários distintos no WaterPaths, o qual irá calcular os respectivos valores das funções objetivo como uma média do desempenho apresentado em cada um dos 1.000 cenários avaliados. Em seguida, o WaterPaths retorna os valores das funções objetivo ao Borg, a fim de que este mantenha um arquivo com as soluções que apresentaram melhor performance (melhores relações de troca entre as funções objetivo).

3.4.8 – Estudo de caso utilizado como referência para o desenvolvimento do WaterPaths acoplado ao Borg

O WaterPaths foi aplicado em um estudo de caso na Carolina do Norte (EUA), onde foram avaliadas as possibilidades de cooperação entre quatro principais companhias de água da região denominada de “Research Triangle” (Figura 3.13): Raleigh, Durham, Cary e OWASA (Orange Water and Sewer Authority).

Os dois principais desafios das companhias que pertencem ao Research Triangle são: (1) desenvolver planos colaborativos para a gestão regional de curto prazo das infraestruturas de água existentes e (2) planejar os investimentos de longo prazo em novas infraestruturas para assegurar o atendimento à demanda futura (Trindade, 2019).

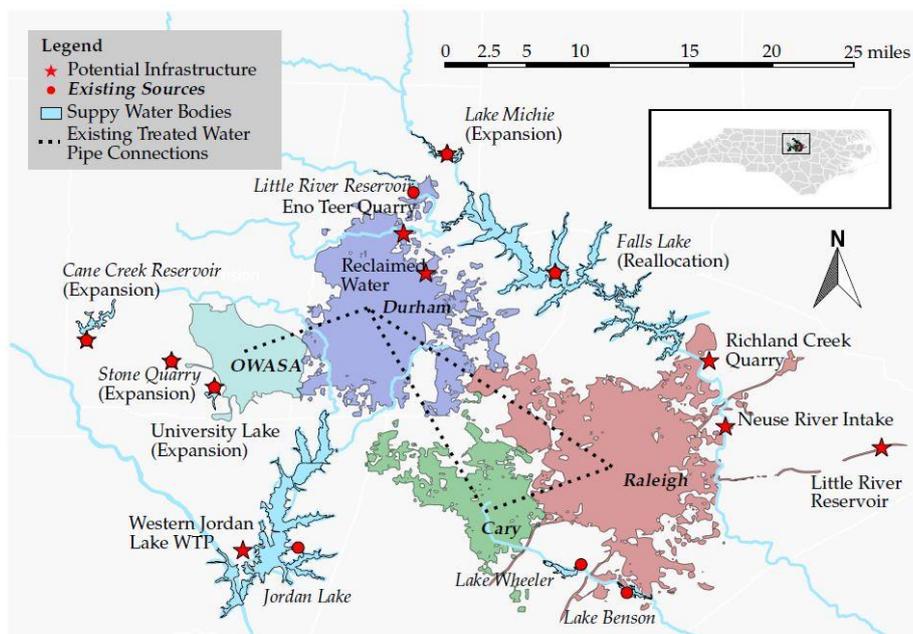


Figura 3.13 - Mapa da área de estudo “Research Triangle”, que evidencia as áreas abastecidas por Raleigh, Cary, Durham e OWASA e interconexões regionais entre os sistemas de distribuição de água.

Fonte: Trindade (2019).

Foram inseridas no modelo todas as infraestruturas de reservação, tratamento e transporte de água já utilizadas pelas quatro companhias, bem como as opções futuras de ampliação da infraestrutura de oferta previstas no Plano de Abastecimento de Água do Research Triangle (TJCOG, 2014). Os novos projetos de investimento em infraestrutura englobam a construção/expansão de reservatórios, captações fio d'água, sistemas de reutilização direta, entre outros.

As funções objetivo descritas no tópico 3.4.6 foram otimizadas considerando um horizonte de planejamento até 2060. Os resultados evidenciaram que: a) a inclusão sistemática da incerteza no processo de otimização foi fundamental para encontrar soluções robustas, que atendessem aos critérios de performance definidos pelas próprias companhias; b) as ações operacionais de curto prazo e os instrumentos financeiros são significativamente interdependentes e retardam a necessidade de realização de investimentos em novas infraestruturas; c) o crescimento da demanda é o fator de incerteza de maior sensibilidade, responsável por ditar, em grande parte dos cenários, a construção de novas infraestruturas; d) a integração consistente das decisões de curto e longo prazo por meio das regras baseadas no RdF do sistema permite que o processo de tomada de decisão seja amparado não apenas pelos registros hidrológicos e pelas medições dos níveis dos reservatórios, mas sobretudo pela simulação das condições futuras possíveis; e e) os investimentos em infraestruturas regionais de abastecimento possibilitaram às companhias de água o alcance de seus objetivos individuais sob custos menores, atendendo às restrições impostas e às condições regulatórias (Trindade *et al.*, 2019).

4. ESTUDO DE CASO APLICADO AO DISTRITO FEDERAL PARA OBTENÇÃO DE PORTFÓLIOS DE ABASTECIMENTO URBANO

Este capítulo é dividido em duas seções principais: a primeira (seção 4.1) consiste na descrição detalhada do estudo de caso dessa pesquisa, com exposição dos principais aspectos relacionados à modelagem do sistema de abastecimento urbano do DF na plataforma WaterPaths, enquanto a segunda (seção 4.2) tem por objetivo detalhar os procedimentos adotados para simular e otimizar as políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF, posteriormente utilizadas para subsidiar as análises dessa pesquisa no capítulo 6 (Resultados e Discussão).

4.1 – DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO ESTUDO DE CASO

4.1.1 – Caracterização da área de estudo

Conforme descrito no item 3.1, o serviço de abastecimento urbano no Distrito Federal constitui-se de cinco sistemas produtores de água principais: Descoberto, Torto/Santa Maria, Brazlândia, Sobradinho/Planaltina e São Sebastião. A capacidade de produção média associada a cada sistema produtor é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Capacidade de produção (abastecimento de água no DF).
Fonte: PDSB (GDF, 2017b).

Sistema Produtor	Capacidade instalada* (l/s)	Capacidade de produção média** (l/s)
Descoberto	5.559,7	5.152,2
Torto/Santa Maria	2.643,9	2.564,3
Brazlândia	151,9	146,0
Sobradinho/Planaltina	1.034,6	938,1
São Sebastião	257,3	214,4
Total	9.647,4	9.015,0

* Capacidade teórica/projetada do sistema.

** Considera as limitações de bombeamento em razão do horário de ponta e restrição de captação dos poços, limitados a 20h/dia.

Constata-se, na Tabela 4.1, o caráter estratégico dos Sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria, visto que estes respondem por 57,2% e 28,4% da produção total de água, respectivamente. Desse modo, para fins de simplificação das análises, optou-se por excluir os Sistemas Brazlândia, São Sebastião e Sobradinho/Planaltina da área de estudo dessa pesquisa, dado que os dois primeiros contribuem com uma parcela pouco significativa do

abastecimento, enquanto o último constitui-se de uma série de captações subterrâneas, as quais totalizam aproximadamente 20% de toda a sua vazão captada (GDF, 2017b). Observa-se também que esses três sistemas são operados de forma independente dos demais, o que favoreceu a sua exclusão da área de estudo.

Os Sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria são constituídos, majoritariamente, por captações superficiais, que contribuem com, respectivamente, 99,6% e 98% da vazão captada (GDF, 2017b). Dentre as captações superficiais, ambos os sistemas são compostos por barragens de nível e de acumulação. No caso do Descoberto, para fins de inclusão na área de estudo, considerou-se apenas o reservatório do Descoberto (barragem de acumulação), tendo em vista que as barragens de nível contribuem com somente 0,6% da produção de água desse sistema (GDF, 2017b). Quanto ao Torto/Santa Maria, cabe inicialmente destacar que, após as obras de ampliação da oferta de água realizadas no ano de 2017 em decorrência da crise hídrica, esse sistema foi reforçado pela captação no Ribeirão Bananal (Subsistema Bananal) e no Lago Paranoá (Subsistema Lago Norte), de modo que ambos passaram a integrar o Sistema Torto/Santa Maria. Nesse sentido, integram a área de estudo a represa de Santa Maria e o Lago Paranoá (barragens de acumulação), bem como as captações fio d'água no Ribeirão Bananal e no Ribeirão do Torto (barragens de nível), visto que todos esses contribuem com um montante significativo da vazão de água captada pelo Sistema Torto/Santa Maria (vide Tabela 4.2).

Cabe ressaltar que as barragens de nível do Ribeirão Bananal e do Ribeirão do Torto foram agrupadas como uma única infraestrutura de abastecimento por necessidade de simplificação da configuração do sistema hídrico na plataforma WaterPaths. Observa-se que tal condição não altera a vazão de abastecimento a ser retirada dessa infraestrutura agrupada, ou seja, caso as duas captações tivessem sido mantidas separadas, a soma da vazão retirada de cada uma delas corresponderia à vazão total retirada da infraestrutura agrupada. Além disso, essa modificação não afeta o balanço de massa do Paranoá, visto que as vazões de deságue nesse manancial referentes aos dois ribeirões (Bananal e Torto) foram mantidas.

Por fim, tem-se que o reservatório de Corumbá IV, localizado no estado do Goiás, também integra o sistema hídrico em análise nessa pesquisa, apesar de ainda não contribuir com o abastecimento de água no DF. Esse manancial constitui o Sistema Produtor Corumbá, fruto de um consórcio entre a CAESB e a companhia de saneamento do estado de Goiás, SANEAGO (GDF, 2017b). Atualmente, o sistema está em fase de conclusão de suas obras

e viabilizará, futuramente, o aporte de até 8.000 l/s de água tratada, divididos igualmente entre a CAESB e a SANEAGO (CAESB, 2019a).

Tem-se, portanto, que a área de estudo dessa pesquisa é composta pelas seguintes infraestruturas de oferta de água (Figura 4.1): reservatório do Descoberto, represa de Santa Maria, Ribeirão Bananal, Ribeirão do Torto, Lago Paranoá e reservatório de Corumbá IV.

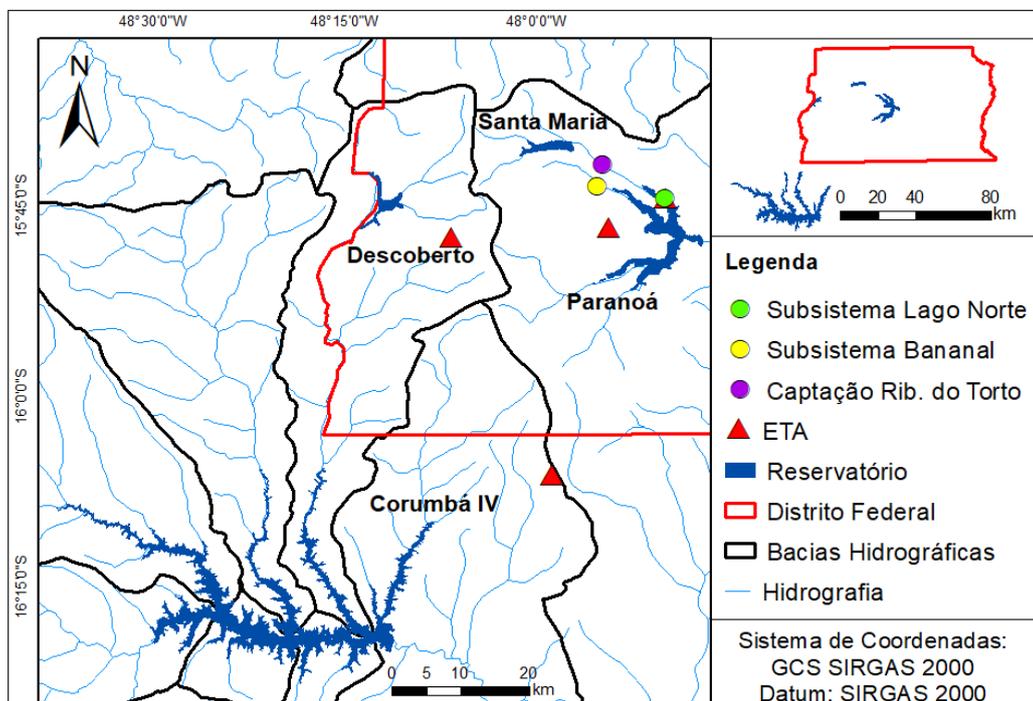


Figura 4.1 - Área de estudo: infraestruturas de oferta de água para abastecimento urbano.

Sabe-se que o serviço de abastecimento de água no DF é prestado por uma única companhia, a CAESB. Todavia, a fim de assegurar melhor representação das peculiaridades e interrelações entre os sistemas produtores, bem como explorar o espectro de análises possibilitadas pela plataforma WaterPaths, optou-se por subdividir a CAESB em duas companhias de saneamento: CAESB_DESC e CAESB_TSM.

À CAESB_DESC, foram atribuídos o reservatório do Descoberto e de Corumbá IV, visto que futuramente o Sistema Produtor Corumbá suplementará o abastecimento de regiões administrativas atualmente atendidas pelo Sistema Descoberto, sobretudo as da região sul do DF (Santa Maria, Gama e Recanto das Emas). Nesse sentido, ambos os sistemas atuarão de modo integrado (CAESB, 2018b).

À CAESB_TSM, foram atribuídos a represa de Santa Maria, as barragens de nível do Ribeirão Bananal e do Ribeirão do Torto e o reservatório do Paranoá, dado que todas essas infraestruturas operam conjuntamente, constituindo um grande sistema integrado.

Tem-se, portanto, que a divisão da CAESB em duas companhias foi motivada para fins de melhor representação das especificidades dos principais sistemas produtores de água atuais (Descoberto e Torto/Santa Maria), os quais apresentam comportamentos muito distintos quanto ao grau de susceptibilidade às condições hidroclimáticas e quanto ao padrão de consumo da população atendida por cada um deles. As principais características das infraestruturas de oferta de água que compõem as duas companhias de saneamento (CAESB_DESC e CAESB_TSM) são resumidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Infraestruturas de oferta de água que compõem cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

Companhia	Nome da infraestrutura hídrica	Tipo de infraestrutura	Vazões médias captadas (l/s)*
CAESB_DESC	Descoberto	Barragem de acumulação	3.856
	Corumbá IV	Barragem de acumulação	**
CAESB_TSM	Santa Maria	Barragem de acumulação	729
	Torto	Barragem de nível	947
	Bananal (Subsistema Bananal)	Barragem de nível	436
	Lago Paranoá (Subsistema Lago Norte)	Barragem de acumulação	509

*Vazões médias captadas no ano de 2019 informadas pela CAESB.

**Ainda não operante.

Além das infraestruturas de oferta de água descritas acima, integram a área de estudo os espaços urbanos das regiões administrativas do DF abastecidas por cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

As regiões administrativas que compõem a demanda da CAESB_DESC correspondem àquelas que hoje são atendidas pelo Sistema Descoberto, visto que atualmente apenas esse sistema está em operação e que o futuro Sistema Corumbá operará de modo integrado a ele. Tais RAs são (Figura 4.2): Taguatinga, Ceilândia, Samambaia, Riacho Fundo, Riacho Fundo II, Recanto das Emas, Águas Claras, Santa Maria, Núcleo Bandeirante, Park Way, Candangolândia, Gama e Vicente Pires (CAESB, 2018c).

Em relação à CAESB_TSM, as regiões administrativas que compõem a demanda da companhia são aquelas abastecidas pelo atual sistema integrado Torto/Santa Maria + Bananal + Lago Paranoá, as quais são (Figura 4.2): Brasília, Sudoeste/Octogonal, Cruzeiro, Lago Norte, Lago Sul, Paranoá, Varjão, Itapoã, Jardim Botânico, Guará (CAESB, 2018c), SIA e SCIA/Estrutural (GDF, 2017b).

Nesse sentido, foram excluídas das análises as seguintes regiões administrativas (Figura 4.2):

- Sobradinho I, Sobradinho II, Planaltina e Fercal: atendidas pelo Sistema Produtor Sobradinho/Planaltina;
- São Sebastião: atendida pelo Sistema Produtor São Sebastião; e
- Brazlândia: atendida pelo Sistema Produtor Brazlândia.

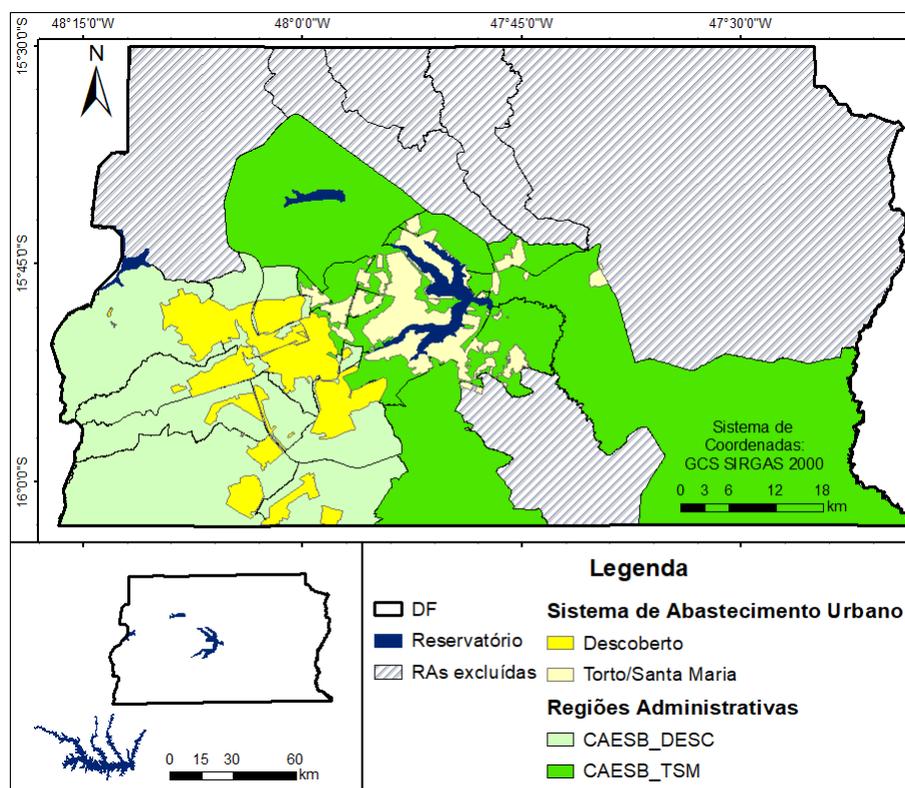


Figura 4.2 - Área de estudo: regiões administrativas abastecidas por cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

Por fim, tem-se que as regiões administrativas do Sol Nascente e Arniqueira não integram, de modo formal, a área de estudo, visto que algumas etapas da pesquisa já haviam sido concluídas quando ambas foram criadas (segundo semestre de 2019). Todavia, tais regiões desmembraram-se da RA de Ceilândia e de Águas Claras, respectivamente, as quais são objeto da área de estudo dessa pesquisa e, portanto, tiveram suas demandas contabilizadas.

4.1.2 – Modelagem do sistema de abastecimento urbano

A simulação do estudo de caso dessa pesquisa, denotado como SAAU/DF, constitui, em seu núcleo essencial, um modelo de balanço hídrico, cujas entradas e saídas estão evidenciadas na Figura 4.3.

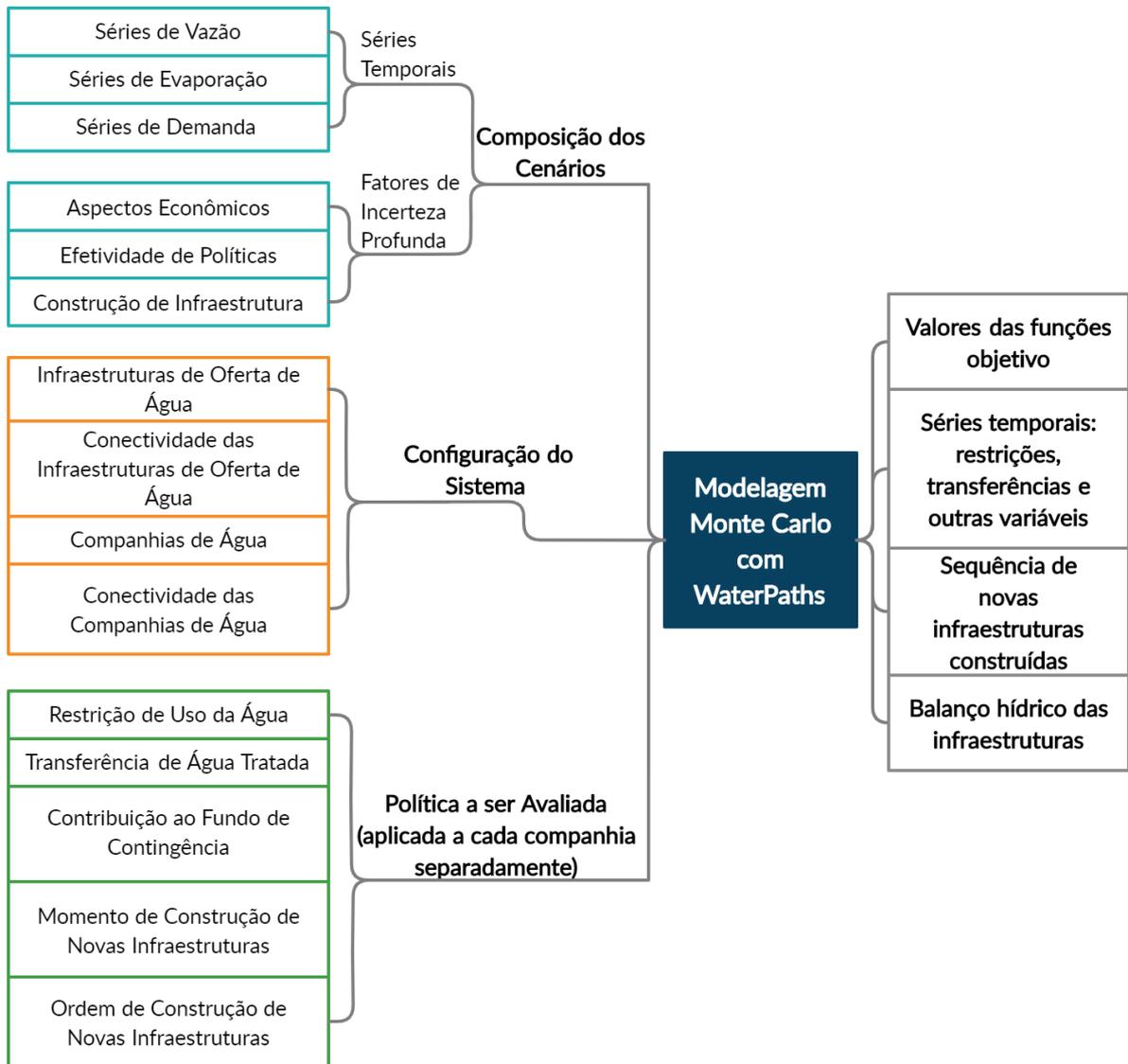


Figura 4.3 – Entradas e saídas do modelo de simulação aplicado ao estudo de caso do SAAU/DF.

Fonte: Adaptado de Trindade *et al.* (2019).

As entradas correspondem às séries temporais hidrológicas e de demanda, aos fatores de incerteza profunda, às características e interconexões das infraestruturas de oferta de água e das companhias de saneamento e, por fim, à política a ser avaliada. Ressalta-se que esta última foi obtida por meio de otimização multiobjetivo realizada com o algoritmo Borg MS

(vide seção 3.4.7). Maiores detalhes sobre os dados de entrada são fornecidos nos tópicos 4.1.2.1 a 4.1.2.5. Quanto às saídas, o sistema fornece as funções objetivo otimizadas, as séries temporais das variáveis do sistema (como restrições e transferências), a sequência de construção das infraestruturas de abastecimento e o balanço hídrico dos sistemas hídricos. A partir dessas saídas, realizou-se a análise de portfólios de abastecimento urbano (capítulo 6), constituídos por ações integradas de curto e longo prazo, associadas à mitigação de eventos de seca e à expansão da infraestrutura de oferta de água, respectivamente.

O sistema de abastecimento urbano modelado nessa pesquisa (SAAU/DF), cuja configuração é apresentada na Figura 4.4, compreende, de modo simplificado, reservatórios, captações fio d'água (captações diretas) e interconexões relacionadas a transferências de água entre companhias.

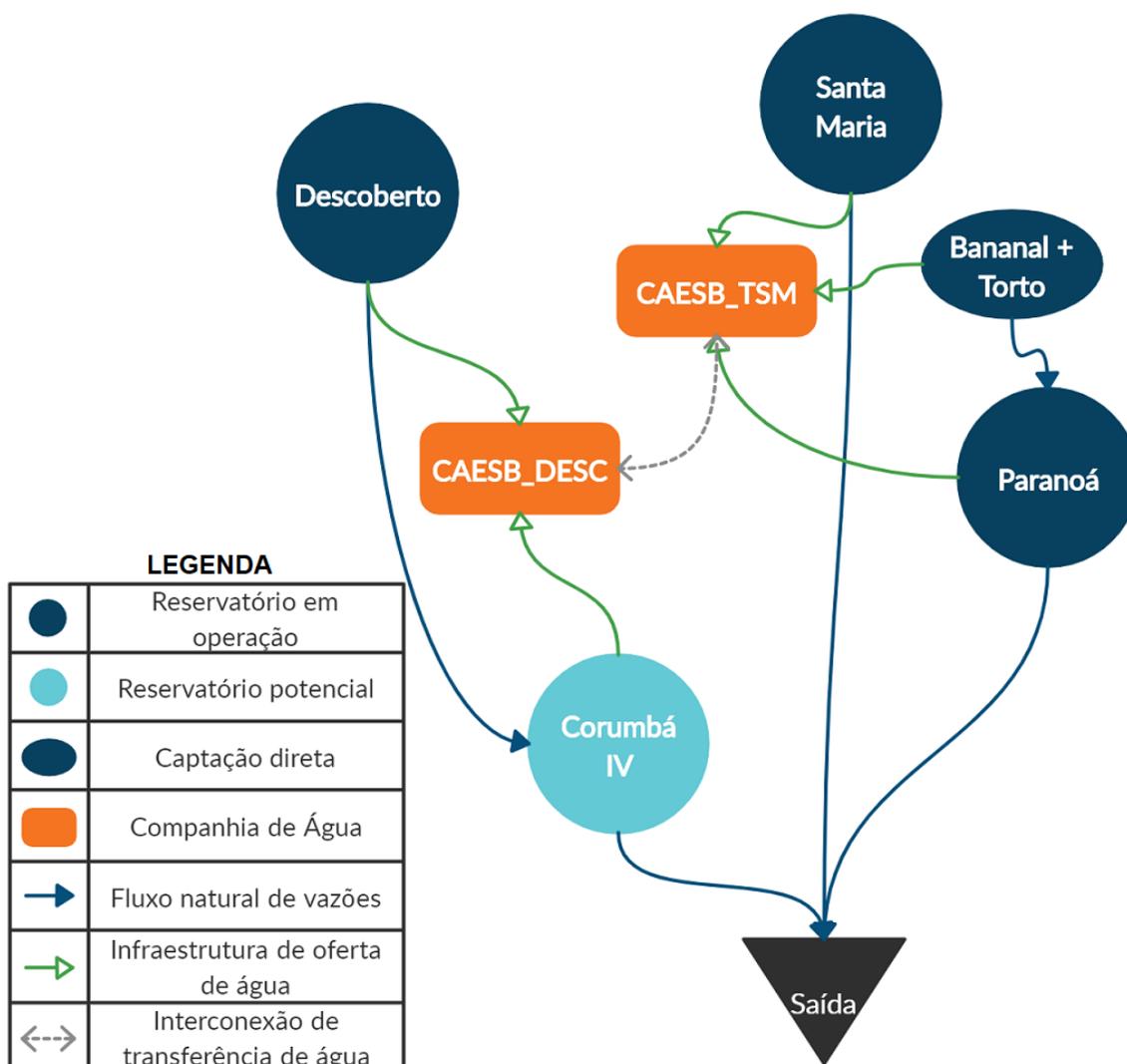


Figura 4.4 - Configuração básica dos principais componentes do sistema de abastecimento urbano referente ao estudo de caso SAAU/DF.
Observação: elementos estão fora de escala.

Os portfólios de abastecimento urbano obtidos visam atender as demandas projetadas para o ano de 2059 referentes às companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM, cujos valores são apresentados na Tabela 4.3. À título de comparação, foram inseridas as demandas referentes ao ano de 2019 nessa mesma tabela. Estima-se, portanto, que em 2059 as demandas de ambas as companhias serão, aproximadamente, 30% superiores às demandas atuais. Tais demandas, por sua vez, são compostas pelas categorias residencial, comercial, industrial e pública, ou seja, categorias pertencentes ao consumo urbano.

Tabela 4.3 - Caracterização das demandas anuais referentes aos anos de 2019 e 2059.

Companhia	População Urbana - 2019	Demanda 2019 (hm³/ano)	População Urbana - 2059	Demanda 2059 (hm³/ano)
CAESB_DESC	1.703.856	90,1	2.185.260	116,6
CAESB_TSM	706.807	53,7	906.507	69,6

As tarifas de água adotadas para cada categoria diferem entre si e foram atribuídas com base na estrutura tarifária da CAESB referente ao período de 01/06/2019 a 31/05/2020 (Apêndice A). Inicialmente, cabe destacar que essa estrutura é organizada em faixas de volume consumido para cada categoria de usuário, cujos valores das tarifas aumentam à medida que o volume consumido aumenta. Todavia, nessa pesquisa adotou-se um valor de tarifa único para cada categoria (residencial, comercial, industrial e pública), o qual foi determinado a partir de um estudo realizado pela Superintendência de Estudos Econômicos e Fiscalização Financeira da ADASA sobre o perfil de consumo dessas categorias em cada RA do Distrito Federal (ADASA, 2018a). Ressalta-se que, à época de realização do referido estudo, o DF possuía apenas 31 RAs.

É importante mencionar que as tarifas de água são reajustadas anualmente e, desse modo, em junho de 2020 passou a vigor uma nova estrutura tarifária, cujas alterações foram determinadas pela resolução ADASA nº 12/2019. Todavia, optou-se por manter os valores referentes à tabela anterior (Apêndice A), tendo em vista que a análise do perfil de consumo das categorias de usuário (ADASA, 2018a) utilizada nessa pesquisa para subsidiar a determinação dos valores únicos de tarifa foi produzida a partir das faixas de consumo da antiga estrutura tarifária.

Para as categorias comercial, pública e industrial, foram adotados os valores de tarifa correspondentes à faixa de consumo superior a 10 m³ mensais, ou seja, 13,18 R\$/m³ para as duas primeiras e 12,02 R\$/m³ para a última. Tais categorias são constituídas por apenas duas faixas de consumo: entre 0 e 10 m³ e acima de 10 m³ (Apêndice A). De acordo com o

relatório divulgado pela ADASA (ADASA, 2018a), a grande maioria dos estabelecimentos consome, mensalmente, um volume superior a 10 m³: em relação às unidades comerciais e industriais, apenas 3 das 31 regiões administrativas avaliadas registraram consumo médio inferior a 10 m³ mensais, ao passo que, no âmbito dos estabelecimentos públicos, apenas uma registrou consumo médio inferior a 10 m³ mensais. Diante dessa realidade, atribuiu-se às categorias comercial, pública e industrial os valores de tarifa correspondentes à faixa cujo consumo supera 10 m³ mensais.

Quanto à categoria residencial, adotou-se um procedimento diferente, dado que esta é composta por seis faixas distintas de consumo. A partir das informações constantes no relatório da ADASA (ADASA, 2018a), efetuou-se uma média ponderada entre o número de unidades residenciais alocadas em cada faixa de consumo e os correspondentes valores de tarifa pagos, de modo a obter a tarifa média de 4,43 R\$/m³ (Tabela 4.4). Esse valor foi comparado à tarifa média praticada pela CAESB no ano de 2018, disponibilizada no Relatório de Indicadores de Desempenho da CAESB (CAESB, 2019b), cujo valor foi de 4,80 R\$/m³ (essa estimativa abrange todas as categorias). Dado que o consumo da categoria residencial totaliza cerca de 85% do volume total consumido, tem-se que o valor estimado de 4,43 R\$/m³ é bastante razoável.

Tabela 4.4 - Quantitativo de unidades residenciais alocadas em cada faixa de consumo.

Faixa de consumo (m³/mês)	Tarifa (R\$/m³)*	Número de unidades residenciais**	Tarifa média geral (R\$/m³)
0 a 10	3,14	650.332	4,43
11 a 15	5,83	209.986	
16 a 25	7,45	112.391	
26 a 35	12,04	17.190	
36 a 50	13,28	5.773	
> 50	14,55	2.643	

* Valores referente à estrutura tarifária da CAESB (Apêndice A).

** Fonte: Análise de impactos regulatórios (AIR) da alteração da estrutura tarifária dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário do Distrito Federal (ADASA, 2018a).

Apresenta-se, na Tabela 4.5, uma síntese dos valores de tarifa de água atribuídos a cada categoria de usuário de ambas as companhias (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

Tabela 4.5 - Tarifas de água atribuídas a cada categoria de usuário para a realização da modelagem.

Categoria de usuário	Tarifa de água (R\$/m³)
Residencial	4,43
Comercial	13,18
Industrial	12,02
Pública	13,18

Em relação à tarifa de esgoto, o sistema WaterPaths permite a entrada de um único dado para cada companhia. Desse modo, adotou-se uma tarifa de esgoto única, obtida a partir do cálculo da média ponderada entre as frações de consumo de água de cada categoria de usuário e seus respectivos valores de tarifas de água. Aquelas foram calculadas a partir da série de consumo mensal fornecida pela CAESB, referente ao período de junho de 2016 a junho de 2019, cujos volumes medidos são discriminados por categoria de usuário (Tabela 4.6). Dado que as companhias atendem diferentes RAs, calculou-se a fração média de consumo de cada categoria entre as RAs que compõem a CAESB_DESC e entre aquelas que integram a CAESB_TSM, conforme se observa na Tabela 4.6. Desse modo, houve uma diferenciação de tarifas de esgoto entre as companhias, o que favorece a fidedignidade dos cálculos de receita arrecadada por cada uma.

Tabela 4.6 - Tarifas de esgoto atribuídas a cada companhia de saneamento para a realização da modelagem.

Categoria de usuário	Tarifa de água (R\$/m³)	Fração média de consumo – CAESB_DESC	Fração média de consumo – CAESB_TSM	Tarifa de esgoto (R\$/m³) – CAESB_DESC	Tarifa de esgoto (R\$/m³) – CAESB_TSM
Residencial	4,43	89,8	80,2	5,3	6,2
Comercial	13,18	7,0	13,2		
Industrial	12,02	0,3	0,5		
Pública	13,18	2,9	6,1		

4.1.2.1 – Definição e composição dos cenários representativos dos estados do mundo (*states of the world*)

Para fins de modelagem, foram simulados 1.000 cenários. A escolha de um elevado número de cenários decorre da importância de se capturar condições mais extremas, capazes de impor maiores dificuldades ao desempenho das políticas avaliadas (Zeff *et al.*, 2014). No contexto do planejamento e da gestão de sistemas hídricos, a exploração de uma ampla gama de cenários que moldam os riscos de desabastecimento auxilia os gestores a identificarem

vulnerabilidades dos sistemas, bem como os critérios principais a serem considerados no processo de tomada de decisão. Além disso, faz-se necessário abarcar quantidade elevada de cenários para assegurar representatividade ao cálculo das cinco funções objetivo implementadas no modelo (vide item 3.4.6).

Conforme descrito no item 3.4.5, cada cenário simulado na plataforma WaterPaths é composto por uma série temporal de vazão e de evaporação associada a cada infraestrutura de oferta de água, bem como uma série de demanda associada a cada companhia de saneamento. No caso das séries de evaporação, observa-se que estas se aplicam somente aos reservatórios (captações fio d'água, não).

Além das séries de vazão, evaporação e demanda, multiplicadores escalares referentes a fatores de incerteza profunda foram incluídos nos cenários, a fim de compor estados futuros do mundo mais complexos, que imponham maiores desafios às políticas simuladas.

Conforme se observa na Tabela 3.1, a versão original da plataforma WaterPaths dispunha de oito fatores de incerteza profunda implementados em sua estrutura. Todavia, no âmbito dessa pesquisa, optou-se por não atribuir multiplicadores escalares ao fator *crescimento da demanda anual média*, dado que o processo de construção das 1.000 séries de demanda (descrito no item 4.2.1.3, apresentado mais a frente) já incorpora multiplicadores escalares, bem como ao fator *crescimento da evaporação anual média*.

Além disso, identificou-se a necessidade de inclusão de um novo fator de incerteza profunda na plataforma WaterPaths, a tarifa de água e esgoto, devido à grande incerteza existente em seus reajustes anuais e ao contexto atual de mudança do marco regulatório no setor de saneamento do Brasil. Tais reajustes são realizados de acordo com uma fórmula paramétrica definida no contrato de concessão entre a ADASA e a CAESB, a qual compreende uma série de elementos variáveis: IPCA, INPC, Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M), consumo de energia elétrica pela companhia, entre outros. Desse modo, ao analisar o histórico de reajustes anuais da tarifa (2010 a 2020), observou-se uma grande variação entre um ano e outro (Tabela 4.7) e, por esse motivo, decidiu-se implementar na plataforma WaterPaths o preço das tarifas como um fator de incerteza profunda. Essa implementação é uma particularidade introduzida no WaterPaths para atender aos objetivos dessa pesquisa.

Tabela 4.7 - Histórico dos reajustes tarifários da CAESB.

Período em vigor	Percentual de aumento sobre a tarifa do ano anterior*	Resolução ADASA
mar/10 - fev/11	4,31	n° 02/2010
mar/11 - fev/12	7,23	n° 08/2011
mar/12 - fev/13	11,2	n° 01/2012
mar/13 - fev/14	9,5	n° 02/2013
mar/14 - fev/15	7,39	n° 01/2014
mar/15 - mai/16	16,2	n° 01/2015
jun/16 - mai/17	7,98	n° 05/2016
jun/17 - mai/18	3,1	n° 07/2017
jun/18 - mai/19	0,93	n° 06/2018
jun/19 - mai/20	3,45	n° 06/2019

* Esse aumento incide sobre as tarifas de todas as categorias de usuários.

Diante do exposto, apresenta-se na Tabela 4.8 uma síntese dos fatores de incerteza profunda que compõem e diferenciam os 1.000 cenários simulados nessa pesquisa.

Tabela 4.8 - Fatores de incerteza profunda considerados no estudo de caso dessa pesquisa.

Tipo	Fator de Incerteza Profunda
Aspectos Econômicos	Taxa de juros (TJ)
	Período de amortização (PA)
	Taxa de desconto (TD)
	Tarifa de água e esgoto (TAE)
Efetividade de Políticas	Eficácia dos estágios de restrição de uso da água (ER)
Construção de Infraestrutura	Prazo para obtenção da licença de construção (PL)
	Custo de construção (CC)

4.1.2.2 – Infraestruturas de oferta de água para abastecimento urbano

As estratégias de longo prazo estão relacionadas à expansão da infraestrutura de oferta de água. Nesse sentido, integram os portfólios as atuais infraestruturas de abastecimento urbano, ou seja, aquelas atualmente utilizadas para atender a demanda de água da população pertencente à área de estudo dessa pesquisa, bem como potenciais projetos de ampliação da infraestrutura de oferta.

As infraestruturas de abastecimento urbano atualmente em operação e que são objeto dessa pesquisa (conforme descrito no item 4.1.1) correspondem ao reservatório do Descoberto, ao Lago Paranoá, à represa de Santa Maria e às barragens de nível do Ribeirão Bananal e do Ribeirão do Torto, cujas principais características constam na Tabela 4.9. Conforme se observa, a água bombeada da represa de Santa Maria, do Ribeirão Bananal e do Ribeirão do

Torto é direcionada a uma mesma estação de tratamento, a ETA Brasília, ao passo que as demais infraestruturas possuem estações próprias.

Tabela 4.9 - Principais características das infraestruturas de oferta atualmente utilizadas pelas companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM.

	Infraestrutura de oferta de água	Volume útil (hm³)*	Percentual do volume útil destinado ao abastecimento urbano	ETA associada	Capacidade de tratamento (l/s)***
CAESB_DESC	Reservatório do Descoberto	72,3	100%	ETA Rio Descoberto	6.000
CAESB_TSM	Lago Paranoá	460,5	8% **	ETA Lago Norte	700
	Represa de Santa Maria	61,3	100%	ETA Brasília	2.800
	Ribeirão Bananal	-	-		
	Ribeirão do Torto	-	-		

* Dados de volume útil do reservatório do Descoberto e da represa de Santa Maria retirados, respectivamente, das Notas Técnicas n° 58/2016 e 61/2016 da ADASA (ADASA, 2016d, 2016e). Quanto ao volume útil do Lago Paranoá, este foi obtido num documento de batimetria fornecido pela CAESB (CAESB, 2003).

** A resolução ADASA n° 33/2018 (ADASA, 2018b) estabelece o nível mínimo a ser praticado no lago Paranoá, a fim de assegurar os usos múltiplos da água. A cota mínima indicada é de 999,8 metros. A cota máxima utilizada corresponde à registrada no Relatório do Levantamento Batimétrico do Lago Paranoá (CAESB, 2003), cujo valor é de 1.000,4 metros. Portanto, o volume compreendido entre a cota máxima e a cota mínima foi atribuído à finalidade de abastecimento público, de modo a constituir 8% do volume útil do lago.

*** Fonte: Estações de Tratamento de Água (CAESB, 2019c). Disponível em:

<<http://atlascaesb.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=4d06131962ca482a9d51502c630e195f>>.

As infraestruturas futuras correspondem aos projetos de expansão da infraestrutura de oferta de água que integram o planejamento da CAESB. Desse modo, a presente pesquisa pautou-se sobre os projetos descritos no Plano Distrital de Saneamento Básico (GDF, 2017b), os quais foram avaliados em posterior reunião com a CAESB, realizada em julho de 2019. Cabe destacar que, nessa pesquisa, consideram-se projetos de ampliação da infraestrutura de oferta todos aqueles que forneçam novo aporte de água à companhia de saneamento, como captações em novos mananciais ou cursos d'água, elevação do nível d'água de barragens, construção de ETAs e/ou ampliação de suas respectivas capacidades de tratamento.

As ações previstas no PDSB (GDF, 2017b) compreendem a operacionalização de novos sistemas produtores e a expansão de sistemas produtores atuais, as quais podem ser agrupadas em três projetos principais: implantação do Sistema Produtor Corumbá, ampliação do Sistema Produtor Paranoá e ampliação da capacidade de armazenamento do reservatório do Descoberto. O primeiro e o último reforçam o Sistema Produtor Descoberto

e, portanto, foram atribuídos à companhia CAESB_DESC nos termos dessa dissertação. A ampliação do Sistema Produtor Paranoá, por sua vez, reforçará o Sistema Torto/Santa Maria e, desse modo, está associada à companhia CAESB_TSM.

O Sistema Produtor Corumbá será implantado em duas etapas principais. A primeira, atualmente em fase de conclusão (CAESB, 2019a), está projetada para produzir 2.800 l/s de água tratada por meio da ETA Valparaíso, enquanto a segunda etapa prevê a ampliação dessa vazão para 5.600 l/s. Em ambas as fases, a vazão produzida será dividida igualmente entre a CAESB e a SANEAGO. Por fim, tem-se uma terceira etapa, na qual o sistema poderá atingir, em sua configuração máxima, a produção de 8.000 l/s de água tratada (CAESB, 2019a). Entretanto, as companhias ainda não dispõem de previsão quanto à execução dessa última etapa.

Observa-se que o reservatório de Corumbá IV atualmente tem como finalidade principal a geração de energia elétrica. Desse modo, este manancial possui uma cota mínima e máxima de operação que deve ser respeitada, cujos valores são especificados em ANA (2019b). O volume de água alocado para fins de abastecimento urbano foi calculado como uma fração do volume útil compreendido entre as cotas mínima e máxima estabelecidas. Tal fração foi obtida a partir da vazão especificada na outorga de captação da CAESB (4 m³/s). Desse modo, obteve-se o valor de 12,85 hm³ como o volume de Corumbá IV disponível para atender a demanda de abastecimento urbano da CAESB.

O Sistema Produtor Paranoá corresponde à ampliação da atual captação do Lago Paranoá, que ocorre por meio do Subsistema Lago Norte. Planeja-se que o empreendimento seja executado em três etapas distintas, de modo que cada uma resultará no acréscimo de 700 l/s à produção de água da companhia. A primeira etapa consistirá na construção de uma nova ETA (ETA Lago Sul) na porção sul do lago, ao passo que a segunda prevê a ampliação de sua capacidade de produção para 1.400 l/s. A última etapa, por sua vez, visa aumentar a capacidade de produção de ambas as estações de tratamento (ETA Lago Sul e ETA Lago Norte) em 350 l/s.

Por fim, a CAESB estuda a possibilidade de alteamento da crista do vertedouro da barragem do Descoberto em 1,5 metros por meio da implantação de comportas de segmento. Essa opção resultaria na ampliação de 25% de sua capacidade de armazenamento e no acréscimo de 400 l/s à vazão captada pelo atual Sistema Produtor Descoberto (GDF, 2017b).

Na Tabela 4.10, são apresentadas as principais informações requisitadas pelo modelo no que concerne às infraestruturas futuras descritas acima. A coluna denominada de “Prazo – obtenção da licença” refere-se ao prazo estimado para que seja realizada a concessão das licenças dos empreendimentos. Desse modo, todas as infraestruturas apresentadas na Tabela 4.10 estão licenciadas, com exceção da etapa 3 de implantação do Sistema Produtor Corumbá, para a qual estimou-se um prazo de 5 anos (a contar do início da simulação), dado que pertence a um empreendimento já em andamento, cuja primeira etapa está em fase de conclusão.

Tabela 4.10 - Projetos de ampliação da infraestrutura de oferta de abastecimento urbano.

	Infraestrutura	Descrição	Custo (R\$ mi)*	Prazo – obtenção da licença (anos)	Aporte de água (l/s)**
CAESB_DESC	Sistema Corumbá – 1ª etapa	Implantação de novo Sistema Produtor	276,5	0	1.400***
	Sistema Corumbá – 2ª etapa	Ampliação da capacidade de produção associada à ETA Valparaíso	222,1	0	1.400***
	Sistema Corumbá – 3ª etapa	Ampliação da capacidade de produção da ETA Valparaíso e implantação de novas adutoras de água bruta	251,4	5	1.200***
	Elevação do nível d'água da barragem do Descoberto	Alteamento da crista do vertedouro da barragem em 1,5 m	7,5	0	400
CAESB_TSM	Sistema Paranoá – 1ª etapa	Construção da ETA Lago Sul na porção sul do lago Paranoá	60,3	0	700
	Sistema Paranoá – 2ª etapa	Ampliação da capacidade de produção da ETA Lago Sul	60,3	0	700
	Sistema Paranoá – 3ª etapa	Ampliação da capacidade de produção da ETA Lago Sul e Lago Norte	60,3	0	700

* Os custos, disponibilizados pelo PDSB (GDF, 2017b), estão em milhão de reais e foram atualizados para dezembro de 2019, cujo índice de correção utilizado corresponde à Taxa de Referência (TR). Para tanto, utilizou-se a calculadora do Banco Central do Brasil, disponível em:

<<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=2>> (BCB, 2020).

** Fonte: PDSB (GDF, 2017b) e Nota Técnica Conjunta N° 15.125/2019 (CAESB, 2019a).

*** Aporte de água correspondente à vazão de tratamento que será destinada à CAESB.

Os empreendimentos descritos na Tabela 4.10 são acionados quando o RdF de longo prazo de sua correspondente companhia ultrapassa um determinado valor limite, definido pela

variável de decisão θ_{ci} . No caso dos Sistemas Corumbá e Paranoá, observa-se que as etapas que os constituem podem ser implementadas isoladamente ou conjuntamente, a depender da necessidade de ampliação da oferta verificada pelo WaterPaths. Desse modo, é possível que o sistema construa as etapas 1, 2 e 3 isoladamente, ou construa as etapas 1 e 2 conjuntamente, ou construa até mesmo as etapas 1, 2 e 3 de uma só vez.

A execução de cada novo projeto de infraestrutura está condicionada ao seu respectivo prazo de obtenção da licença, ou seja, se determinada infraestrutura for acionada pelo modelo antes de decorrido o respectivo prazo, esta será postergada e o modelo acionará um outro projeto. Além disso, cada projeto é executado mediante a aquisição de empréstimos a uma taxa de juros de 7% ao ano e período de amortização de 20 anos. Adotou-se uma taxa de desconto de 4% para atualizar, ao valor presente, as parcelas de pagamento dos empréstimos e as receitas das companhias. Tais valores foram definidos com base no relatório de demonstrações financeiras da CAESB (CAESB, 2018d).

Segundo o referido documento, os empréstimos relacionados à ampliação e/ou melhoria da infraestrutura de abastecimento de água são majoritariamente adquiridos com a Caixa Econômica e o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Dos 41 contratos vigentes em 2018, 31 foram firmados com a Caixa Econômica. Portanto, adotou-se uma taxa de juros de 7% a.a., semelhante às praticadas nesses contratos, as quais variam entre 6 e 12% a.a. Optou-se pela adoção de um valor não tão elevado devido ao fato de que alguns empréstimos adquiridos com outras instituições possuem taxa de juros inferior a 5%.

Quanto à taxa de desconto, tem-se que a correção monetária das parcelas de empréstimos efetuados com a Caixa Econômica ocorre, usualmente, por meio da Taxa de Referência (TR) ou do CDI (CAESB, 2018d). Ao analisar o histórico desses índices de correção monetária, observou-se que a TR média dos últimos dez anos foi de 0,76%. Contudo, optou-se por adotar 4% como o valor de referência devido ao fato de o CDI ser um indexador mais elevado e de as receitas serem atualizadas por índices maiores, como INPC ou IPCA, cujas médias dos últimos 10 anos foram, respectivamente, 5,84% e 5,85%. Dessa forma, ao adotar o valor de 4% para a taxa de desconto, aproxima-se mais da atualização monetária das receitas, e, apesar das parcelas dos empréstimos se tornarem um pouco menores, evita-se que as receitas sejam superestimadas, o que constitui uma definição mais conservadora para a simulação e fornece maior segurança à companhia.

Por fim, no que concerne ao período de amortização das parcelas dos empréstimos efetuados, adotou-se um prazo de 20 anos. Conforme consta no relatório de demonstrações financeiras da CAESB (CAESB, 2018d), os empréstimos adquiridos, sobretudo aqueles com a Caixa Econômica e o BID, são amortizados em torno de 40 parcelas semestrais, ou seja, 20 anos. Portanto, considerou-se razoável assumir esse valor para a realização da modelagem.

4.1.2.3 – Balanço hídrico das infraestruturas de oferta de água

No item 3.4.2, foi apresentada a equação geral do balanço de massa (Equação 3.4) executado pelo sistema WaterPaths sobre os reservatórios utilizados por cada uma das companhias de saneamento.

Na Equação 3.4, observa-se que o volume de água disponível em tais sistemas (x_s^{w+1}), cujo cálculo é atualizado semanalmente, é calculado a partir do volume na semana anterior (x_s^w), das vazões naturais afluentes (Q), da vazão referente ao lançamento de efluentes (Ef), da vazão descarregada por outro reservatório a montante (Qrm), do volume de água evaporado (calculado a partir do produto entre a taxa de evaporação (E) e a área do reservatório como função do volume armazenado ($AR(x_s^w)$)), da vazão remanescente obrigatória (Qr), da demanda de água urbana associada a cada infraestrutura (Dr) e da vazão vertida (Qv).

O tratamento aplicado sobre os dados referentes aos termos Q e E é detalhado nos tópicos 4.2.1.1 e 4.2.1.2. A demanda Dr é distribuída pelo sistema WaterPaths e provém das séries de demanda sintéticas (DI) geradas, cujos procedimentos são descritos no item 4.2.1.3. Para as captações fio d'água (Ribeirão Bananal e Ribeirão do Torto), ressalta-se que E é estimado como zero e Qv não se aplica.

Quanto à vazão de lançamento de efluentes (Ef), tem-se que apenas o Lago Paranoá recebe contribuição significativa, cuja origem corresponde à ETE Brasília Norte e ETE Brasília Sul. Desse modo, assumiu-se, nessa pesquisa, que a componente Ef equivale a zero para as demais infraestruturas. Tal dado, por sua vez, é inserido no modelo como a fração da demanda de água de cada companhia que é convertida em esgoto tratado e posteriormente lançada no Lago Paranoá. No caso da companhia CAESB_DESC, as RAs que contribuem para o lançamento de efluentes no referido corpo hídrico são: Águas Claras (parcialmente), Candangolândia, Núcleo Bandeirante, Riacho Fundo e Riacho Fundo II (CAESB, 2019d). Quanto à companhia CAESB_TSM, contribuem as RAs de Brasília, Cruzeiro,

SCIA/Estrutural, Guará, Lago Norte, Lago Sul, Sudoeste/Octogonal, SIA e Varjão (CAESB, 2019d). Tem-se, portanto, que os seguintes procedimentos foram adotados para estimativa de Ef no Paranoá:

- A partir da série de consumo mensal de cada RA (GDF, 2017b), cuja extensão é de três anos (07/2013 a 06/2016 – Apêndice B), calculou-se a fração da demanda anual das companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM correspondente às RAs listadas acima, que contribuem com o lançamento de efluentes no Lago Paranoá. Em seguida, calculou-se o percentual médio entre os anos da série (2013, 2014, 2015 e 2016), de modo a obter 21,96% para a companhia CAESB_DESC e 90,51% para a CAESB_TSM. Isso significa que as RAs das companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM cujos esgotos são lançados no Lago Paranoá são responsáveis por 21,96% e 90,51% das respectivas demandas totais de cada companhia (Tabela 4.11);
- Posteriormente, tais percentuais médios (21,96% e 90,51%) foram multiplicados por 85,36%, que corresponde ao indicador de 2018 da CAESB referente ao percentual de esgoto tratado com relação ao volume de água consumida (Caesb, 2019b). Desse modo, tem-se que cerca de 18,74% e 77,26% da demanda de água das companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM, respectivamente, é convertido em efluente tratado e  posteriormente lançado no Lago Paranoá (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 - Fração da demanda de água convertida em efluente tratado e lançada no Lago Paranoá.

	Percentual da demanda total de cada companhia correspondente às RAs que contribuem com o lançamento de efluentes no Lago Paranoá					Percentual da demanda total convertida em efluente e lançada no Lago Paranoá (Ef)
	2013	2014	2015	2016	Média	
CAESB_DESC	22,58%	22,43%	21,14%	21,48%	21,96%	18,74%
CAESB_TSM	91,33%	90,88%	90,15%	89,93%	90,51%	77,26%

A relação de área x Volume dos reservatórios (Apêndice C), necessária para subsidiar os cálculos da componente $AR(x_s)$, foi retirada de notas técnicas emitidas pela ADASA no que concerne ao Descoberto e  Santa Maria (ADASA, 2016d, 2016e). Para o Lago Paranoá, os dados foram obtidos em um levantamento batimétrico realizado pela CAESB (CAESB, 2003), ao passo que as informações concernentes ao reservatório de Corumbá IV foram retiradas do Portal SNIRH (ANA, 2019b).

Quanto às vazões remanescentes (Qr), estas foram obtidas em diferentes documentos. Ao reservatório do Descoberto e de Corumbá IV, atribuiu-se um valor único para todas as semanas do ano, conforme valores especificados em Rocha e C  zar (2015) e CTE (1999), respectivamente. Ao Lago Paranoá, definiu-se um valor de vazão remanescente para o período de estiagem (maio a outubro) e outro valor para o período chuvoso (novembro a abril), de acordo com especificações da resolução ADASA n   33/2018 (ADASA, 2018b). As vazões remanescentes dos Ribeirões Bananal e Torto, por sua vez, são discriminadas mensalmente, conforme determinações do Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do DF (PGIRH/DF) (GDF, 2012). Observa-se que os correspondentes valores mensais de vazão remanescente de cada um dos ribeirões foram somados, tendo em vista que essas duas infraestruturas foram agrupadas em uma só. Por fim,    represa de Santa Maria atribuiu-se uma vazão de zero, dado que essa barragem não é dotada de descarga de fundo. Os referidos dados constam no Apêndice D.

4.1.2.4 – Instrumentos de mitigação de secas

Os instrumentos de mitigação de secas explorados nessa pesquisa por meio da plataforma WaterPaths correspondem às restrições de uso da água, que conduzem à redução da demanda, e às transferências de água entre companhias. Ambos são governados pela métrica de RdF de curto prazo, de acordo com as Equações 4.1 e 4.2, as quais são calculadas no âmbito de cada companhia de saneamento.

$$D_j^w = f(x_{rdfCP,j}^w, \theta_{gr,j}, \theta_{\Delta gr,j}) \quad (\text{Equação 4.1})$$

$$T_j^w = f(x_{rdfCP,j}^w, \theta_{gt,j}) \quad (\text{Equação 4.2})$$

Onde j denota a companhia de saneamento ($j = 1,2$), D_j^w corresponde à demanda efetiva de água na semana w , T_j^w representa o volume de água tratada a ser transferido na semana w , $x_{rdfCP,j}^w$ corresponde ao valor do RdF de curto prazo calculado na semana w , $\theta_{gr,j}$ e $\theta_{\Delta gr,j}$ correspondem aos gatilhos responsáveis por desencadear a implementação de diferentes estágios de restrição, ao passo que $\theta_{gt,j}$ representa o gatilho relacionado às transferências de   gua (Trindade *et al.*, 2019; Zeff *et al.*, 2014, 2016).

Política de Restrição

A política de restrição definida nessa pesquisa é composta por três estágios distintos, os quais implementam diferentes percentuais de redução sobre a demanda da companhia à medida que o grau de severidade das secas progride. Desse modo, cada estágio é acionado quando a métrica de RdF de curto prazo ultrapassa os valores limites definidos pelas variáveis de decisão θ_{gr} e $\theta_{\Delta gr}$, de acordo com as seguintes expressões:

- 1º estágio: acionado quando o valor do RdF de curto prazo ultrapassa θ_{gr} ;
- 2º estágio: acionado quando o valor do RdF de curto prazo ultrapassa $\theta_{gr} + \theta_{\Delta gr}$;
- 3º estágio: acionado quando o valor do RdF de curto prazo ultrapassa $\theta_{gr} + 2 * \theta_{\Delta gr}$.

Atribuiu-se ao primeiro, segundo e terceiro estágios uma redução percentual de 2%, 4% e 14%, respectivamente, a incidir sobre as demandas de água das companhias. Nesse sentido, tem-se que no primeiro estágio, a demanda efetiva da companhia equivalerá a 98% de sua demanda irrestrita (demanda original), ao passo que no segundo e terceiro estágios, esses valores corresponderão, respectivamente, a 96% e 86%. Tais valores foram estimados por meio da comparação entre dados de consumo referentes ao período de implementação de medidas de combate à crise hídrica no DF (Tabela 4.12) e ao ano imediatamente anterior, 2016.

Observa-se, na Tabela 4.12, que as principais medidas adotadas pelo GDF durante a crise hídrica, em ordem sequencial, foram: campanha de conscientização, tarifa de contingência e racionamento – este último incidiu sobre as localidades atendidas pelos Sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria. Nesse sentido, a estimativa da redução percentual atribuída a cada estágio da política de restrição está associada à implementação progressiva dessas três medidas:

- 1º estágio (menos restritivo): campanha de conscientização (redução de 2%);
- 2º estágio: campanha de conscientização (redução de 2%) + tarifa de contingência (redução de 2%);
- 3º estágio (mais restritivo): campanha de conscientização (redução de 2%) + racionamento (redução de 12%).

Tabela 4.12 - Cronologia de implementação das principais medidas de combate à crise hídrica do DF e variações de consumo registradas.

Mês	Variação de consumo em relação aos respectivos meses de 2016*	Principais medidas de combate à crise hídrica do Distrito Federal
Dez/16	- 5,67%**	Campanha de conscientização + tarifa de contingência
Janeiro/17	- 4,98%	Campanha de conscientização + tarifa de contingência + racionamento Descoberto
Fevereiro/17	- 11,62%	Campanha de conscientização + tarifa de contingência + racionamento Descoberto e Torto/Santa Maria
Março/17	- 12,59%	
Abril/17	- 14,51%	
Maió/17	-14,27%	
Junho/17	-10,73%	
Julho/17	-15,99%	Campanha de conscientização + racionamento Descoberto e Torto/Santa Maria
Agosto/17	- 8,58%	
Setembro/17	-11,77%	
Outubro/17	-5,26%	
Novembro/17	-5,54%	
Dezembro/17	-16,06%	
Janeiro/18	-10,25%	
Fevereiro/18	-10,51%	
Março/18	-13,69%	
Abril/18	-17,42%	
Maió/18	-14,21%	
Junho/18	-11,08%	

* Fonte: adaptado do sítio eletrônico da CAESB (CAESB, 2018e). Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/agua/crise-hidrica-historico/tarifa-de-contingencia.html>>.

** Redução referente ao consumo de dezembro de 2015.

As estimativas referentes à redução percentual da demanda de água ocasionada pela campanha de conscientização e pela tarifa de contingência não constam em documentos oficiais e, portanto, primou-se pela adoção de valores mais conservadores. Observa-se, na Tabela 4.12, que o mês de dezembro de 2016 registrou uma redução no consumo de 5,67% em relação ao mês de dezembro de 2015. Dado que naquele mês foram implementadas campanhas de conscientização e tarifa de contingência, optou-se por associar a cada uma dessas medidas uma redução percentual de 2%, a fim de evitar a superestimação de seus respectivos graus de eficácia.

Nesse contexto, destaca-se que as campanhas de conscientização geralmente correspondem à primeira estratégia a ser implementada após a constatação da situação de escassez hídrica, visto que objetivam informar a população e incentivá-la a consumir de modo mais racional e econômico. Todavia, tais campanhas somente alcançam maior grau de efetividade quando implementadas a longo prazo e de modo contínuo, a fim de possibilitar que a mudança

comportamental seja maior e permanente. Quanto à tarifa de contingência, tem-se que, à época da crise hídrica, esta foi implementada durante a vigência de campanhas de conscientização, as quais também contribuíam para a redução de consumo registrada (Tabela 4.12), ainda que de forma pouco significativa. Além disso, a cobrança dessa tarifa se estendeu por um curto período de tempo e incidiu somente sobre usuários cujo consumo era superior a 10 m³, de modo que o seu resultado deve ser visto com parcimônia.

Quanto ao racionamento, tem-se que a implementação dessa medida durante a crise hídrica possibilitou a redução de 12% da demanda de água relativa aos Sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria, segundo dados do documento *Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica* (GDF, 2017a). Tal valor foi confirmado pelo cálculo da média dos percentuais de redução apresentados na Tabela 4.12 (= 11,6%) referentes aos meses de junho de 2017 a junho de 2018, período no qual a implementação do racionamento prevaleceu. Dentre as medidas consideradas nessa pesquisa, tem-se que esta é, indubitavelmente, a de maior impacto para os usuários e, por isso, foi atribuída apenas ao último estágio.

Cabe ressaltar que tais percentuais de redução atribuídos a cada estágio não precisam necessariamente decorrer da implementação dessas três medidas específicas. O que se pretende é avaliar se esses percentuais de redução da demanda são eficazes em diminuir o risco de falha do sistema, ou seja, o risco de desabastecimento. No caso dessa pesquisa, vincularam-se os percentuais de redução de cada estágio a três medidas específicas com o intuito de se construir uma política de restrição mais realista, pautada sobre resultados alcançados em experiências passadas, e também de se analisar a relação de causa e efeito entre as medidas adotadas e a redução do risco de desabastecimento.

Quanto à existência de três estágios de restrição, o seu objetivo principal consiste em avaliar se percentuais menores de redução da demanda, característicos dos primeiros estágios, são suficientes para resolver o problema, de modo a evitar que a população seja penalizada com medidas mais gravosas. O grau de restrição aumenta, portanto, de forma gradativa a cada estágio, possibilitando que restrições mais severas sejam acionadas apenas diante de condições mais extremas, como secas de maior magnitude.

Por fim, observa-se que o valor original da tarifa de água referente a cada categoria de usuário foi mantido no primeiro e segundo estágios da política de restrição (Tabela 4.13). Em relação ao terceiro estágio, aplicou-se uma tarifa extra de acordo com os percentuais

indicados na Resolução ADASA nº 17/2016 (ADASA, 2016c), a qual estabelece tarifa de contingência para os serviços públicos de abastecimento de água do DF em razão de situação crítica de escassez hídrica. Desse modo, aplicou-se um aumento de 40% sobre o valor original da tarifa paga pela categoria residencial e de 20% às tarifas das demais categorias (comercial, industrial e pública). Cabe ressaltar que se optou por aplicar a tarifa extra apenas sobre o terceiro estágio pelo fato de ser uma medida de difícil implementação, tendo em vista os custos sociais e políticos envolvidos, além do impacto direto sobre a situação econômica das famílias, especialmente as mais desfavorecidas em termos de renda.

As principais características da política de restrição implementada na modelagem do estudo de caso dessa pesquisa estão resumidas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resumo das principais características da Política de Restrição implementada no estudo de caso dessa pesquisa.

Estágio de Restrição	Categoria de Usuário	Redução sobre a demanda	Valor da tarifa de água (R\$/m³)
Primeiro	Residencial	2%	4,43
	Comercial		13,18
	Industrial		12,02
	Pública		13,18
Segundo	Residencial	4%	4,43
	Comercial		13,18
	Industrial		12,02
	Pública		13,18
Terceiro	Residencial	14%	6,20
	Comercial		15,82
	Industrial		14,42
	Pública		15,82

Política de Transferência

A política de transferência implementada está associada às interconexões existentes entre os dois principais sistemas produtores do DF, Descoberto e Torto/Santa Maria, os quais, no contexto da abordagem dessa pesquisa, pertencem a companhias distintas: CAESB_DESC e CAESB_TSM, respectivamente. A transferência ocorre nos dois sentidos, mas as capacidades são diferentes: o sistema Torto/Santa Maria transfere até 700 l/s de água tratada ao sistema Descoberto, ao passo que este transfere até 500 l/s àquele.

O modelo aciona transferências de água sempre que o RdF de curto prazo das companhias exceder o limiar definido pelas suas respectivas variáveis de decisão θ_{gt} . Todavia, existem limitações de dois tipos associadas à transferência de água: 1) a primeira está relacionada à

capacidade máxima de transferência, cujo valor corresponde a 500 l/s, quando proveniente da companhia CAESB_DESC, e 700 l/s, quando proveniente da CAESB_TSM; 2) a segunda decorre de uma medida de segurança, segundo a qual a companhia requisitada não poderá transferir água quando estiver utilizando mais de 90% de sua capacidade total de tratamento.

A transferência entre os sistemas ocorre a partir de suas respectivas estações de tratamento de água (ETA Brasília e ETA Rio Descoberto), cujas águas tratadas são bombeadas para o reservatório de distribuição localizado no Eixo Monumental (RAP.CRZ.001). Essa integração entre os sistemas possibilita a implementação de estratégias operacionais que resultem na melhor utilização dos dois reservatórios, de modo a viabilizar a recuperação destes nos períodos chuvosos e o cumprimento de seus papéis de reguladores do abastecimento nos períodos secos (CAESB, 2019e).

As transferências possuem elevados custos associados, sobretudo àqueles decorrentes de bombeamento. Dessa forma, tal custo foi estimado a partir da aplicação de um percentual extra de 10% sobre a tarifa de água, cujo valor é transferido da companhia que recebe água para a outra. Em outras palavras, quando a companhia CAESB_DESC receber água da companhia CAESB_TSM, aquela pagará a esta uma tarifa 10% mais cara para cada metro cúbico de água recebido e vice-versa. Nessa situação, demonstra-se a importância da manutenção de um fundo de contingência, pois a companhia disporá de reservas financeiras passíveis de cobrir, de modo parcial ou integral, esses custos menos previsíveis.

As principais características da política de transferência implementada na modelagem do estudo de caso dessa pesquisa estão resumidas na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resumo das principais características da Política de Transferência implementada no estudo de caso dessa pesquisa.

Sentido de Transferência	Capacidade Máxima (l/s)	Tarifa Paga (R\$/m³)
CAESB_TSM para CAESB_DESC	700	Residencial – 4,87 Comercial – 14,50 Industrial – 13,22 Pública – 14,50
CAESB_DESC para CAESB_TSM	500	Residencial – 4,87 Comercial – 14,50 Industrial – 13,22 Pública – 14,50

4.1.2.5 – Instrumentos financeiros

Os instrumentos financeiros implementados no sistema WaterPaths têm como objetivo principal proteger as finanças das companhias frente à ocorrência de secas e consequente aumento de despesas. No estudo de caso dessa pesquisa, optou-se por incluir na modelagem apenas o fundo de contingência (vide seção 3.4.6.4), cujo funcionamento é detalhado na Equação 4.3.

$$FC^{y+1} = FC^y * (1 + r) + \theta_{cafc}^y * RAT^y \quad (\text{Equação 4.3})$$

onde FC corresponde à quantia total de dinheiro acumulada no fundo de contingência, RAT representa a receita total do ano y , θ_{cafc}^y corresponde à porcentagem da receita total do ano y que será alocada ao fundo de contingência e r representa a taxa de juros do fundo.

4.1.2.6 – Métrica de Risco de Falha (RdF)

O procedimento de cálculo da métrica de Risco de Falha implementado na plataforma WaterPaths é minuciosamente detalhado no item 3.4.1. A configuração original dessa métrica no referido modelo incluía apenas uma condição de falha do sistema, que ocorre quando o volume total (somatório do volume de todos os reservatórios da companhia) disponível em uma determinada semana atinge valores inferiores a 20% da capacidade total de armazenamento (somatório dos volumes correspondentes às capacidades máximas dos reservatórios da companhia) (vide Equação 3.2).

Todavia, após a execução de algumas simulações preliminares, verificou-se a necessidade de adicionar uma segunda condição de falha ao cálculo dessa métrica devido a particularidades associadas ao sistema integrado Torto/Santa Maria, pertencente à companhia CAESB_TSM. Observou-se que o maior problema associado ao referido sistema correspondia à pequena capacidade de tratamento da ETA Brasília (2.800 l/s), responsável por tratar as águas provenientes da represa de Santa Maria, do Ribeirão do Torto e do Ribeirão Bananal. Desse modo, constatou-se que, em determinados períodos da simulação, a CAESB_TSM dispunha de água bruta suficiente, mas era incapaz de atender a demanda total devido à limitada capacidade de tratamento do sistema.

Dado que o somatório dos volumes disponíveis nos reservatórios da companhia CAESB_TSM era sempre superior a 20% da capacidade total, o sistema não registrava

nenhuma falha, de modo que o valor da métrica de RdF mantinha-se sempre em zero ao longo do horizonte de simulação. Como consequência, instrumentos de mitigação das secas (restrições e transferências) e construção de novas infraestruturas nunca eram acionados, tendo em vista que estes são governados pela métrica de RdF e, nessa situação, o risco calculado era sempre zero.

Diante dessa constatação, fez-se necessário adicionar ao cálculo da métrica de risco uma condição de falha relacionada à capacidade de tratamento das companhias. Determinou-se então que a métrica de risco também registrasse como falha, ao longo do horizonte de simulação, as semanas em que a demanda das companhias superasse 90% da capacidade de tratamento combinada de suas ETAs.

Sugere-se que trabalhos futuros definam tal percentual juntamente à CAESB, a fim de avaliar com maior precisão o limiar de risco aceitável quanto ao esgotamento da capacidade de tratamento da companhia, de modo a não prejudicar a continuidade e regularidade do serviço de abastecimento urbano prestado.

4.2 – ETAPAS DO PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO SAAU DO DF

A metodologia aplicada neste trabalho é descrita em duas etapas principais:

- 1) Geração das séries temporais sintéticas e dos multiplicadores escalares: construção das séries sintéticas de vazão, taxas de evaporação e demanda, variáveis denominadas nessa pesquisa como incertezas bem-caracterizadas, e amostragem dos fatores de incerteza profunda definidos na Tabela 4.8. As referidas séries temporais sintéticas e os multiplicadores escalares das incertezas profundas constituem os cenários que serão simulados para avaliar a performance das políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF;
- 2) Identificação e análise das políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF (frente de Pareto aproximada): utilização do sistema de simulação estocástica WaterPaths acoplado ao Borg MS para identificar e explorar as melhores políticas de abastecimento urbano, ou seja, aquelas que mais se aproximam da real frente de Pareto.

Os procedimentos adotados nessas etapas são detalhados nos tópicos 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 – Geração das séries temporais sintéticas e dos multiplicadores escalares

Conforme abordado no item 4.1.2.1, a simulação requer a entrada de 1.000 séries sintéticas de vazão, de taxas de evaporação e de demanda, cujos procedimentos adotados são descritos nos itens 4.2.1.1, 4.2.1.2 e 4.2.1.3, respectivamente. Tais séries compõem os diferentes cenários sob os quais a performance das políticas de abastecimento será avaliada.

As séries sintéticas geradas possuem extensão de 40 anos, horizonte de planejamento dessa pesquisa, cujo termo inicial e final correspondem a janeiro de 2020 e dezembro de 2059, respectivamente. Destaca-se, todavia, que tais séries estão desagregadas na escala semanal, dado que o modelo opera de acordo com o passo semanal. Desse modo, são compostas por 2086 valores, o que representa a quantidade de semanas contidas em 40 anos.

Além dessas três variáveis, compõem os cenários sete fatores de incerteza profunda, para os quais foram gerados 1.000 multiplicadores escalares (amostras). O respectivo procedimento de amostragem adotado é descrito no item 4.2.1.4.

4.2.1.1 – Séries sintéticas de vazão

As séries históricas de vazão utilizadas nessa pesquisa correspondem aos principais afluentes dos reservatórios Descoberto, Santa Maria, Paranoá e Corumbá IV (Figura 4.5).

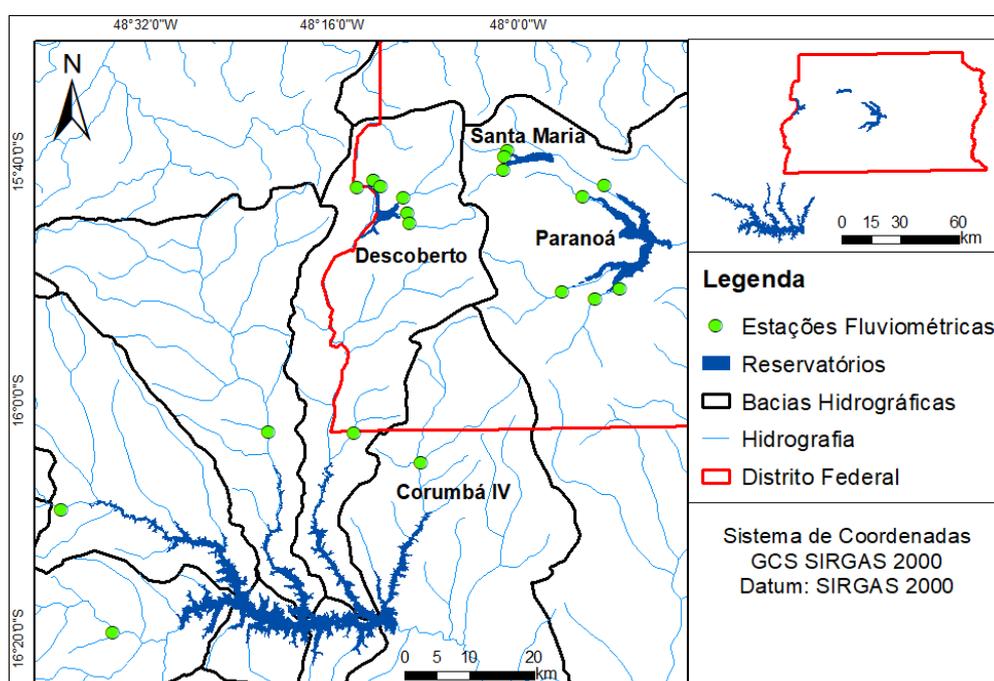


Figura 4.5 - Estações fluviométricas utilizadas.

Os registros de vazão são provenientes de estações fluviométricas, cujas localizações e detalhes constam na Figura 4.5 e na Tabela 4.15, respectivamente. Tais dados foram obtidos no Portal *Hidroweb*, gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2019a).

Tabela 4.15 – Estações fluviométricas utilizadas para realização da modelagem.
Fonte: Portal *Hidroweb* (ANA, 2019a).

DESCOBERTO			
Estação Fluviométrica	Código	Período de dados	Escala
Descoberto Chácara 89	60435000	5/1978 – 4/2018	Diário
Chapadinha Aviário (DF-180)	60435100	5/1978 – 4/2018	Diário
Olaria (DF-080)	60435150	10/1985 – 4/2018	Diário
Ribeirão Rodeador (DF-435)	60435200	6/1978 – 4/2018	Diário
Capão Comprido	60435300	5/1978 – 4/2018	Diário
Ribeirão das Pedras (DF-180)	60435400	5/1978 – 9/2017	Diário
SANTA MARIA			
Estação Fluviométrica	Código	Período de dados	Escala
Milho Cozido	60477030	8/1985 – 2/2019	Mensal
Vargem Grande	60477050	3/1982 – 2/2019	Mensal
Santa Maria	60477070	4/1982 – 2/2019	Mensal
PARANOÁ			
Estação Fluviométrica	Código	Período de dados	Escala
Ribeirão do Torto	60477400	9/1978 – 4/2018	Diário
Ribeirão Bananal	60477600	1/1971 – 12/2003	Diário
Ribeirão Riacho Fundo	60478200	5/1978 – 7/1994 12/2005 – 5/2018	Diário
Ribeirão do Gama	60478500	1/1984 – 5/2018	Diário
Ribeirão Cabeça de Veado	60478600	12/1970 – 5/2018	Diário
CORUMBÁ IV			
Estação Fluviométrica	Código	Período de dados	Escala
Areias	60433000	11/2013 – 12/2018	Diário
Engenho das Lajes	60436400	5/2009 – 3/2018	Diário
Alagado	60444100	2/2010 – 5/2016	Diário
Fazenda Beira	60444500	12/2011 – 12/2018	Diário
Campo Limpo	60444700	11/2013 – 12/2018	Diário

A geração das séries sintéticas de vazão baseou-se no modelo clássico de decomposição, cuja abordagem é simples, porém funcional. Tal escolha foi norteada pela qualidade limitada dos dados disponíveis. Constatou-se que os registros de vazão que compõem as séries históricas de cada estação fluviométrica apresentam inúmeras lacunas e diversos valores repetidos. Além disso, algumas das séries têm extensão muito pequena, enquanto outras coincidem temporalmente por período inferior a três anos, a exemplo de afluentes do reservatório de Corumbá IV (Tabela 4.15). A variação na escala de registro de dados

corresponde a outro aspecto limitante, dado que algumas séries possuem observações diárias, enquanto outras possuem apenas registros mensais.

Tendo em vista as limitações apresentadas pelas referidas séries temporais e os desafios associados ao extenso horizonte de planejamento adotado nessa pesquisa (2020 a 2059), optou-se pela simplicidade e certa robustez na modelagem das séries temporais, o que possibilitou a utilização de um procedimento único e a obtenção de previsões mais coerentes. Evidentemente, tem-se que, a depender da regularidade e da extensão dos dados, modelos mais sofisticados podem ser utilizados, como os modelos estocásticos sazonais, a exemplo do SARIMA (Brockwell e Davis, 2006), ou os modelos dinâmicos de séries temporais (Harvey, 1989). Todavia, optou-se pela aplicação do modelo clássico de decomposição por este ter demonstrado desempenho satisfatório para o conjunto de dados disponível.

Apesar de serem aproximações da realidade natural formuladas sob restrições conceituais, algumas abordagens determinísticas podem representar de modo satisfatório o comportamento de determinados fenômenos. É o caso de modelos que conjugam componentes determinísticas e estocásticas em suas equações, as quais se ajustam de forma razoável às variáveis que possuem algum tipo de periodicidade, como sazonalidade (Detzel, 2015). Efeitos sazonais repetem-se com certa regularidade e, por isso, podem ser tratados como determinísticos (Lawrance e Kottegoda, 1977). Como exemplo, tem-se as séries de vazões médias de um rio, as quais podem ser modeladas por meio da combinação (em geral, adição) de suas componentes periódicas (determinísticas) e estocásticas (Adamowski, 1971).

Nesse contexto, o modelo clássico de decomposição descreve a série temporal como uma combinação de componentes determinísticas (Brockwell e Davis, 2006), definidas como tendência, ciclicidade e sazonalidade. A tendência (T) é verificada quando os dados da série temporal exibem comportamento crescente ou decrescente associado ao longo prazo. A ciclicidade (C) é caracterizada por flutuações periódicas da variável com duração superior a um ano, a exemplo do ciclo decenal, enquanto a sazonalidade (S) refere-se a oscilações periódicas de curto prazo, cujas durações são inferiores a um ano. Por fim, o modelo é composto por uma componente aleatória, denominada de irregularidade (ϵ), a qual decorre de medições imprecisas ou casos fortuitos. Cabe destacar que nem sempre uma série temporal apresenta todas as referidas componentes, ainda que o modelo clássico seja considerado apropriado para analisá-la. Dessa forma, a decomposição da série permite

identificar quais componentes atuam em seu conjunto de dados, bem como possibilita obter equações que subsidiarão a realização de previsões.

Neste trabalho, ao analisar as séries temporais de vazão agregada dos tributários de cada reservatório, constatou-se a presença de um padrão decenal nos dados, bem como de sazonalidade acentuada, evidenciada pela ocorrência de mínimos e máximos a cada 52 semanas, aproximadamente. Para exemplificar, tem-se no painel esquerdo da Figura 4.6 a evolução temporal da vazão agregada (média diária por semana das vazões somadas de todos os afluentes) referente ao reservatório do Descoberto, de outubro de 1985 a abril de 2018. Nota-se, nesse painel, o formato assimétrico das ondas percorridas pelos dados, com picos mais acentuados, ao passo que a evolução da sua transformação logarítmica, evidenciada no painel direito, apresenta flutuações com aspecto mais simétrico.

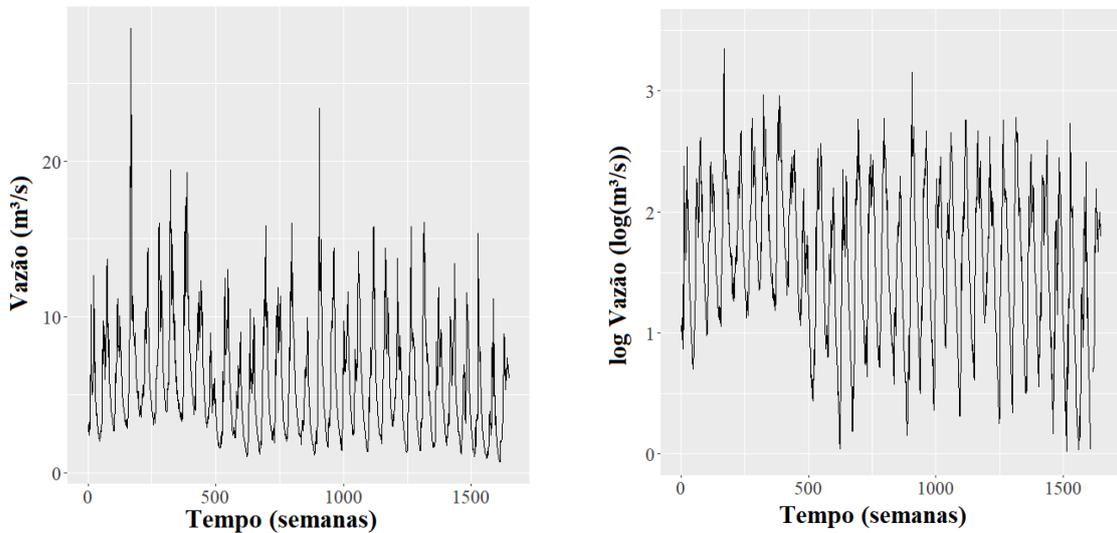


Figura 4.6 - Painel esquerdo: evolução temporal da vazão agregada (média diária por semana) referente ao reservatório do Descoberto, de 10/10/1985 a 30/04/2018. Painel direito: evolução do logaritmo da vazão.

Desse modo, tem-se que a vazão média diária Q_w , registrada na semana w , pode ser obtida por meio da soma das componentes identificadas nos registros das séries históricas, conforme apresentado na Equação 4.4:

$$\ln Q_w = D_w + S_w + \varepsilon_w \quad (\text{Equação 4.4})$$

em que D_w representa o movimento decenal, S_w denota o padrão sazonal e ε_w representa um ruído aleatório gaussiano com média nula e variância σ^2 .

O processo de decomposição é efetuado por etapas. Primeiramente, estima-se a componente decenal pelo método dos mínimos quadrados (ou regressão linear). De posse da sua

estimativa, denotada por \widehat{D}_w , a vazão sem o efeito decenal é expressa por meio da diferença $\ln Q_w - \widehat{D}_w \approx S_w + \varepsilon_w$. Baseado nessa diferença, obtém-se a estimativa da componente sazonal, denotada por \widehat{S}_w , também pelo método dos mínimos quadrados. Por fim, estima-se a variância residual ($\hat{\sigma}^2$) segundo a Equação 4.5:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum (\ln Q_w - \widehat{D}_w - \widehat{S}_w)^2}{n - v}, \quad (\text{Equação 4.5})$$

na qual n corresponde ao tamanho da série temporal e v , ao número de coeficientes ajustados no modelo.

Portanto, a série sintética é gerada com base no modelo ajustado da Equação 4.6, com $\varepsilon_w \sim N(0, \hat{\sigma}^2)$.

$$Q_w = \exp(\widehat{D}_w + \widehat{S}_w + \varepsilon_w) \quad (\text{Equação 4.6})$$

Para a representação dos movimentos cíclicos evidenciados pela componente decenal e sazonal, considerou-se, neste trabalho, a abordagem de polinômios harmônicos. Tem-se que o padrão decenal e a sazonalidade determinística podem ser modelados por meio de uma combinação linear de senos e cossenos. Com base na análise espectral e no teorema de Fourier, o qual possui boa aceitação na literatura (Fleming e Weber, 2012), uma função com período constante p pode ser escrita como uma aproximação da série de Fourier, dada como uma combinação linear de harmônicos $H_{k,w}$ com q frequências (Brockwell e Davis, 2006; Harvey, 1989), de acordo com a Equação 4.7.

$$\sum_{k=1}^q H_{k,w} \quad (\text{Equação 4.7})$$

Tem-se que cada harmônico $H_{k,w}$ é definido segundo a Equação 4.8:

$$H_{k,w} = \alpha_k \cos \frac{2\pi k w}{p} + \beta_k \sin \frac{2\pi k w}{p} \quad (\text{Equação 4.8})$$

em que os coeficientes α_k e β_k são estimados pelo método dos mínimos quadrados. No caso de dados semanais, o período sazonal corresponde a 52 semanas ($p = 52$), enquanto o ciclo decenal tem duração de 520 semanas ($p = 520$), aproximadamente.

As estimativas dos coeficientes da série de Fourier (α_k e β_k) foram submetidas ao cálculo da razão t , estatística de teste aplicada para verificar o quão distante os coeficientes

estimados estão da hipótese de serem, na realidade, nulos. Por exemplo, se $\hat{\alpha}_k$ representa a estimativa de mínimos quadrados do coeficiente α_k , a razão t correspondente se define como $\tau = \hat{\alpha}_k / e.p.(\hat{\alpha}_k)$, em que $e.p.(\hat{\alpha}_k)$ representa o erro padrão de $\hat{\alpha}_k$.

Por fim, avaliou-se o nível de significância da razão t obtida, a fim de precaver-se, com certa segurança, de que as diferenças observadas nos dados não tenham decorrido de um mero acaso estatístico. Para tanto, calculou-se o p -valor ($= P(|T| > |\tau|)$), que corresponde à probabilidade de se obter uma estatística de teste igual ou mais extrema do que a observada nos dados amostrais, na qual a variável aleatória T segue uma distribuição t de Student (Lawton, 2009). Desse modo, assumiu-se a probabilidade limite de 0,05 para o cálculo do p -valor como indicador da presença de diferença estatística significativa e, portanto, como referencial para rejeitar a hipótese de que os coeficientes estimados sejam nulos. Maiores detalhes sobre estimação podem ser encontrados em Freund *et al.* (2006).

4.2.1.2 – Séries sintéticas de taxas de evaporação

As séries temporais históricas de evaporação utilizadas nessa pesquisa correspondem aos reservatórios do Descoberto, Santa Maria e Paranoá. Os registros se referem à lâmina d'água evaporada (mm) em tanques de estações climatológicas, as quais estão evidenciadas na Tabela 4.16. Destaca-se que não foi possível coletar dados referentes à evaporação no reservatório de Corumbá IV, não obstante a realização de ampla pesquisa em base de dados e de consultas a instituições públicas e privadas. Desse modo, adotou-se a série referente ao Paranoá para o reservatório de Corumbá IV.

Tabela 4.16 - Séries temporais de evaporação utilizadas para a realização da modelagem.

	Estação Climatológica/Tanque	Período de dados	Escala	Fonte
Descoberto	ETA Brazlândia (código: 1548007)	01/1986 - 12/2014	Mensal	CAESB*
Santa Maria	CAESB-Hidrologia (código: 1547029)	01/1995 - 12/2014	Mensal	CAESB*
Lago Paranoá	- Estação Climatológica UnB (01/1982 – 12/1999) - Tanque Classe A da Fazenda Água Limpa – UnB (01/2000 – 12/2017)	01/1982 - 12/2017	Mensal	PTARH**

* Séries fornecidas pela ADASA.

** Série obtida a partir de um estudo de balanço hídrico do Lago Paranoá realizado no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB).

As séries sintéticas de evaporação foram geradas de modo semelhante às séries sintéticas de vazão, ou seja, por meio do procedimento de decomposição. Todavia, o padrão decenal não pôde ser ajustado devido à carência e à escala dos dados disponíveis. Desse modo, as séries temporais de taxas de evaporação foram ajustadas conforme a Equação 4.9:

$$\ln E_w = S_w + \varepsilon_w \quad (\text{Equação 4.9})$$

Em que E_w representa a evaporação média diária registrada na semana w , S_w refere-se à sazonalidade, estimada pelo método dos mínimos quadrados, e ε_w corresponde a um ruído aleatório gaussiano com média nula e variância σ^2 .

Os movimentos cíclicos evidenciados pela componente sazonal foram modelados a partir da abordagem de polinômios harmônicos, assim como procedeu-se com as séries de vazão. Desse modo, determinou-se a sazonalidade por meio da combinação linear de senos e cossenos (Equação 4.8), cujos respectivos coeficientes foram estimados pelo método dos mínimos quadrados.

4.2.1.3 – Séries sintéticas de demanda

As séries de demanda de água geradas nessa pesquisa também possuem 2086 semanas de extensão, que correspondem ao período de 40 anos (2020 a 2059). Os dados principais utilizados como base para a construção das 1.000 séries de demanda são provenientes de um estudo de projeção populacional do DF realizado pelo IBGE (IBGE, 2018) e de um histórico de consumo per capita médio das regiões administrativas disponibilizado pela CAESB (Apêndice B).

Para fins de aplicação no estudo de caso dessa pesquisa, tem-se que as demandas futuras de água foram estimadas a partir da consideração de quatro hipóteses fundamentais, a saber:

- A população urbana do Distrito Federal aumenta a uma taxa constante de 0,045% ao ano durante o horizonte de simulação;
- O consumo per capita é constante ao longo do horizonte de simulação;
- O percentual de perdas na distribuição é constante ao longo do horizonte de simulação;
- e
- A demanda de água associada a cada companhia irá variar entre 95% e 120% da demanda de referência, de modo a possibilitar a construção de 1.000 cenários distintos de demanda.

Após a assunção dessas quatro hipóteses, procedeu-se à obtenção das séries sintéticas de demanda a partir da execução de quatro procedimentos principais:

- 1) Estimativa da projeção populacional semanal das RAs do Distrito Federal;
- 2) Cálculo do consumo per capita semanal médio de cada RA;
- 3) Obtenção da série de demanda de referência para cada companhia de saneamento; e
- 4) Geração das 1.000 séries de demanda para cada companhia de saneamento.

O fluxograma da execução de tais procedimentos é apresentado na Figura 4.7, os quais são descritos em maiores detalhes nos tópicos posteriores.

1) Estimativa da projeção populacional semanal das RAs do Distrito Federal

A projeção demográfica obtida nessa pesquisa foi elaborada a partir do estudo disponibilizado pelo IBGE, intitulado como “Projeções da População – Brasil e Unidades da Federação: revisão 2018” (IBGE, 2018). Essas projeções fornecem informações até o ano de 2060, cujo horizonte temporal é de 50 anos, visto que têm como termo inicial os dados do último censo demográfico, realizado em 2010. Ressalta-se que o principal objetivo das projeções populacionais é apontar tendências e não informações absolutas/imutáveis, pois tratam-se de estimativas assentadas em hipóteses de comportamento demográfico, sujeito a mudanças ao longo do tempo.

O IBGE adotou o método das componentes demográficas para projetar as populações, o qual incorpora as informações sobre as tendências observadas, em nível nacional e regional, de mortalidade, fecundidade e migração (IBGE, 2018), de acordo com a Equação 4.10:

$$P_{(y+n)} = P_{(y)} + B_{(y,y+n)} - D_{(y,y+n)} + I_{(y,y+n)} - E_{(y,y+n)} \quad (\text{Equação 4.10})$$

Em que:

- $P_{(y+n)}$ = população no ano $y + n$;
- $P_{(y)}$ = população no ano y ;
- $B_{(y,y+n)}$ = nascimentos ocorridos entre y e $y + n$;
- $D_{(y,y+n)}$ = óbitos ocorridos entre y e $y + n$;
- $I_{(y,y+n)}$ = imigrantes do período compreendido entre y e $y + n$;
- $E_{(y,y+n)}$ = emigrantes do período compreendido entre y e $y + n$;
- y = ano inicial; e

- n = tamanho do intervalo em anos.

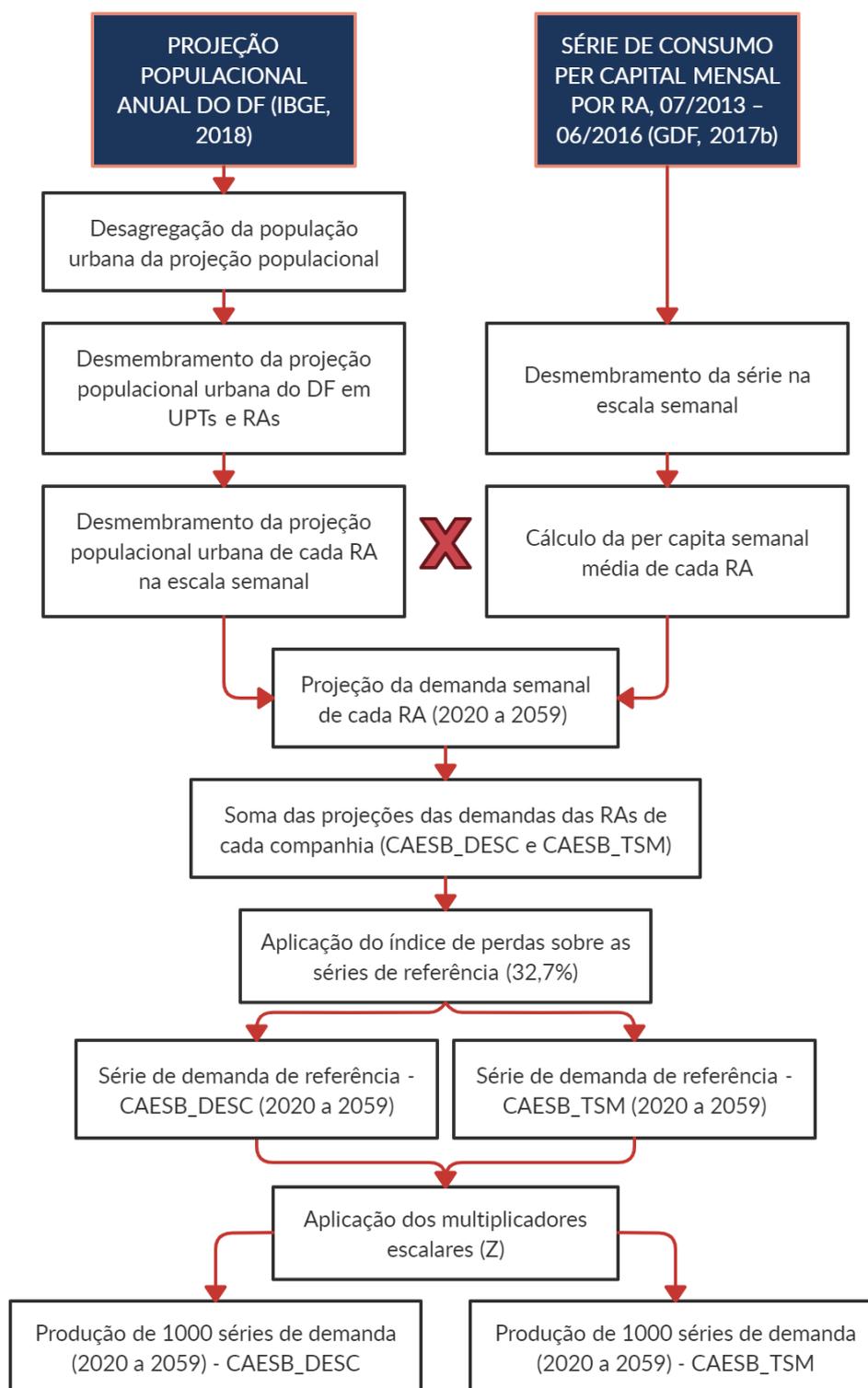


Figura 4.7 - Fluxograma dos procedimentos adotados para a geração das séries de demanda de água de cada companhia.

Desse modo, o método vincula-se a estimativas e projeções dos níveis e padrões de cada uma destas componentes (fecundidade, mortalidade e migração), por meio das quais obtém-

se a população futura. Maiores informações sobre o método das componentes demográficas podem ser obtidas em IBGE (2018).

Tem-se, todavia, que a projeção populacional fornecida pelo IBGE está na escala anual e compreende toda a população do DF, tanto urbana quanto rural. Desse modo, alguns procedimentos foram adotados para adaptá-la às finalidades dessa pesquisa e aos requisitos da plataforma WaterPaths: a) inicialmente, desmembrou-se a população rural da projeção populacional, visto que essa pesquisa engloba apenas os sistemas de abastecimento urbano; b) em seguida, a projeção populacional do DF foi desagregada em Unidades de Planejamento Territorial (UPTs) e, posteriormente, em 31 regiões administrativas, das quais apenas 25 integram o escopo dessa pesquisa (vide item 4.1.1); e c) por fim, a projeção populacional anual referente a cada RA foi desmembrada na escala semanal, visto que o modelo adota o passo semanal em suas simulações.

Destaca-se que os passos 1 e 2 descritos acima foram executados de acordo com a metodologia utilizada no Plano Distrital de Saneamento Básico (GDF, 2017b) para fins de obtenção da projeção populacional urbana de cada RA do DF. Todavia, o horizonte de planejamento adotado no plano é de apenas 20 anos, cujo termo final corresponde a 2037. Tendo em vista que o horizonte de simulação dessa pesquisa se estende até o ano de 2059, não foi possível aproveitar os dados de projeção demográfica utilizados no PDSB.

A seguir, serão descritos, de modo sucinto, os principais procedimentos realizados em cada uma das três etapas mencionadas acima.

a) Projeção populacional urbana do Distrito Federal

A população do DF é majoritariamente urbana. Em 2010, o percentual da população residente em áreas urbanas era de 96,6%, de acordo com o último censo do IBGE (IBGE, 2011). Em 2018, esse percentual se manteve muito próximo do registrado em 2010, atingindo o valor de 96,96%, segundo estimativas do PDAD/DF (CODEPLAN, 2019). Tem-se, portanto, um crescimento anual médio da população urbana do DF de 0,045%. Esse ritmo reduzido está associado, sobretudo, à elevada taxa de urbanização já existente.

Nesse sentido, assumiu-se a hipótese de que, entre os anos de 2018 a 2059, a participação da população urbana no Distrito Federal seguirá aumentando a uma taxa anual constante de 0,045%, de modo a atingir o quantitativo de 3.748.201 habitantes ao final do ano de 2059,

conforme evidenciado na Tabela 4.17. Cabe ressaltar que o horizonte de referência dessa pesquisa tem como termo inicial o ano de 2020.

Tabela 4.17 – Projeção da população urbana do Distrito Federal (2018 – 2059).

Ano	População total do DF – IBGE (2018)	% População Urbana	População Urbana do DF
2018	2.972.209	96,96	2.881.854
2019	3.012.718	97,01	2.922.487
2020	3.052.546	97,05	2.962.496
2021	3.091.667	97,10	3.001.854
2022	3.130.014	97,14	3.040.496
2023	3.167.502	97,19	3.078.337
2024	3.204.070	97,23	3.115.318
2025	3.239.675	97,28	3.151.394
2026	3.274.291	97,32	3.186.540
2027	3.307.883	97,37	3.220.721
2028	3.340.408	97,41	3.253.892
2029	3.371.845	97,46	3.286.032
2030	3.402.180	97,50	3.317.126
2031	3.431.469	97,55	3.347.227
2032	3.459.755	97,59	3.376.375
2033	3.487.020	97,64	3.404.552
2034	3.513.254	97,68	3.431.747
2035	3.538.436	97,73	3.457.937
2036	3.562.521	97,77	3.483.077
2037	3.585.467	97,82	3.507.125
2038	3.607.260	97,86	3.530.065
2039	3.627.893	97,91	3.551.889
2040	3.647.352	97,95	3.572.582
2041	3.665.603	98,00	3.592.108
2042	3.682.634	98,04	3.610.455
2043	3.698.469	98,09	3.627.644
2044	3.713.123	98,13	3.643.688
2045	3.726.600	98,18	3.658.590
2046	3.738.900	98,22	3.672.348
2047	3.750.030	98,27	3.684.968
2048	3.760.007	98,31	3.696.464
2049	3.768.831	98,36	3.706.835
2050	3.776.493	98,40	3.716.070
2051	3.782.994	98,45	3.724.169
2052	3.788.348	98,49	3.731.145
2053	3.792.555	98,54	3.736.995
2054	3.795.598	98,58	3.741.702
2055	3.797.474	98,63	3.745.260
2056	3.798.193	98,67	3.747.678

Ano	População total do DF – IBGE (2018)	% População Urbana	População Urbana do DF
2057	3.797.772	98,72	3.748.972
2058	3.796.218	98,76	3.749.146
2059	3.793.533	98,81	3.748.201

b) Projeção da população urbana por UPT e por RA do Distrito Federal

A desagregação da projeção populacional urbana do DF em UPTs e RAs (Tabela 4.18) baseou-se no método das distribuições proporcionais, segundo o qual a tendência futura está associada à tendência passada (GDF, 2017b).

Tabela 4.18 – UPTs do Distrito Federal e respectivas RAs.

Unidades de Planejamento Territorial (UPTs)	Regiões Administrativas (RAs)
UPT Central	Plano Piloto
	Cruzeiro
	Candangolândia
	Sudoeste/Octogonal
UPT Adjacente I	Lago Sul
	Varjão
	Park Way
	Lago Norte
UPT Adjacente II	Núcleo Bandeirante
	Guará
	Riacho Fundo
	SCIA – Estrutural
	Águas Claras
	SIA
UPT Oeste	Vicente Pires
	Taguatinga
	Ceilândia
	Samambaia
UPT Norte	Brazlândia*
	Sobradinho*
	Planaltina*
	Sobradinho II*
UPT Leste	Fercal*
	São Sebastião*
	Paranoá
	Jardim Botânico
UPT Sul	Itapoã
	Gama
	Santa Maria
	Recanto das Emas
	Riacho Fundo II

* Essas RAs não integram o escopo dessa pesquisa.

Para tanto, foram utilizados, além dos dados correspondentes ao censo de 2010 do IBGE, os estudos demográficos consolidados nos documentos de Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios – Distrito Federal (PDAD/DF) referentes aos anos de 2011, 2013, 2015 e 2018, produzidos pela Companhia de Planejamento do Distrito Federal (CODEPLAN, 2012, 2014, 2016, 2019). Os estudos referentes à PDAD/DF são realizados no âmbito do DF e buscam retratar as realidades específicas de cada UPT/RA em termos de expansão urbana, o que confere maior representatividade às estimativas populacionais realizadas.

Inicialmente, calculou-se o percentual de participação relativa de cada UPT na população urbana do DF nos anos de 2010, 2011, 2013, 2015 e 2018 a partir dos dados demográficos do IBGE (IBGE, 2011) e dos documentos de PDAD/DF (CODEPLAN, 2012, 2014, 2016, 2019).

Em seguida, calculou-se a média das participações relativas de cada UPT nos anos de 2010, 2011, 2013, 2015 e 2018 (Tabela 4.19). Tal média foi utilizada para estimar as populações anuais das UPTs no período de 2018 a 2059 (Tabela 4.19, última coluna). Projetou-se então a população urbana de cada UPT até o ano de 2059 por meio do produto entre a projeção da população urbana de cada ano (Tabela 4.17) e os percentuais médios de participação relativa de cada UPT (Tabela 4.19), cujos resultados são apresentados no Apêndice E.

Tabela 4.19 - Evolução da participação percentual relativa de cada UPT na população urbana do DF entre 2010 e 2018.

UPT	2010 (IBGE)		2011 (PDAD)		2013 (PDAD)		2015 (PDAD)		2018 (PDAD)		% médio de participação relativa de cada UPT
	Absoluto	%									
Total DF (urbana)	2.481.684	100	2.556.149	100	2.786.686	100	2.906.574	100	2.881.854	100	
Central	305.616	12,31	308.674	12,08	317.830	11,41	308.233	10,60	322.664	11,20	11,52
Adjacente I	88.992	3,59	91.872	3,59	93.830	3,37	93.631	3,22	92.170	3,20	3,39
Adjacente II	361.616	14,57	377.968	14,79	409.613	14,70	448.545	15,43	463.775	16,09	15,12
Oeste	832.273	33,54	853.359	33,38	944.212	33,88	997.031	34,30	925.024	32,10	33,44
Norte	305.961	12,33	315.115	12,33	354.964	12,74	362.229	12,46	331.726	11,51	12,27
Leste	188.448	7,59	200.436	7,84	230.137	8,26	238.620	8,21	269.446	9,35	8,25
Sul	398.779	16,07	408.725	15,99	436.100	15,65	458.285	15,77	477.049	16,55	16,01

As projeções urbanas de cada UPT foram então desagregadas em suas respectivas RAs por meio dos mesmos procedimentos realizados anteriormente. Inicialmente, calculou-se o percentual de participação relativa de cada RA no total da população urbana de sua respectiva UPT nos anos de 2010 (dados do IBGE), 2011, 2013, 2015 e 2018 (dados do

PDAD). Em seguida, calculou-se a média, entre os 5 anos distintos, dos percentuais de participação relativa de cada RA em sua respectiva UPT (Tabela 4.20, última coluna). Esses percentuais médios foram então adotados para estimar as populações anuais das regiões administrativas no período de 2018 a 2059.

Tabela 4.20 - Evolução da participação percentual relativa de cada RA na população urbana de sua respectiva UPT entre 2010 e 2018.

Localidade - UPT - RA	População Urbana										% médio da participação relativa de cada RA
	2010	2010 (%)	2011	2011 (%)	2013	2013 (%)	2015	2015 (%)	2018	2018 (%)	
Central	305.616	100	308.674	100	317.830	100	308.233	100	322.664	100	
Brasília/Plano Piloto	208.617	68,26	209.926	68,01	216.489	68,11	210.067	68,15	221.326	68,59	68,23
Cruzeiro	31.379	10,27	31.230	10,12	32.182	10,13	29.535	9,58	31.079	9,63	9,94
Candangolândia	15.924	5,21	15.953	5,17	16.886	5,31	15.641	5,07	16.489	5,11	5,18
Sudoeste/Octogonal	49.696	16,26	51.565	16,71	52.273	16,45	52.990	17,19	53.770	16,66	16,65
Adjacente I	88.992	100	91.872	100	93.830	100	93.631	100	92.170	100	
Lago Sul	29.521	33,17	29.677	32,30	30.629	32,64	28.981	30,95	29.754	32,28	32,27
Varjão	8.724	9,80	9.021	9,82	9.292	9,90	8.453	9,03	8.802	9,55	9,62
Park Way	18.137	20,38	19.648	21,39	19.727	21,02	19.803	21,15	20.511	22,25	21,24
Lago Norte	32.610	36,64	33.526	36,49	34.182	36,43	36.394	38,87	33.103	35,92	36,87
Adjacente II	361.616	100	377.968	100	409.613	100	448.545	100	463.775	100	
Núcleo Bandeirante	22.531	6,23	22.569	5,97	23.714	5,79	23.562	5,25	23.619	5,09	5,67
Guará	107.226	29,65	107.817	28,53	119.923	29,28	133.171	29,69	134.002	28,89	29,21
Riacho Fundo	33.927	9,38	35.268	9,33	37.606	9,18	40.098	8,94	41.410	8,93	9,15
SCIA/Estrutural	30.327	8,39	32.148	8,51	35.094	8,57	38.429	8,57	35.520	7,66	8,34
Águas Claras	101.925	28,19	109.935	29,09	118.864	29,02	138.562	30,89	161.184	34,75	30,39
SIA	2.488	0,69	2.448	0,65	1.997	0,49	1.990	0,44	1.549	0,33	0,52
Vicente Pires	63.192	17,47	67.783	17,93	72.415	17,68	72.733	16,22	66.491	14,34	16,73
Oeste	832.273	100	853.359	100	944.212	100	997.031	100	925.024	100	
Taguatinga	198.350	23,83	197.783	23,18	212.863	22,54	207.045	20,77	205.670	22,23	22,51
Ceilândia	394.085	47,35	404.287	47,38	451.872	47,86	479.713	48,11	432.927	46,80	47,50
Samambaia	197.485	23,73	201.871	23,66	228.356	24,18	258.457	25,92	232.893	25,18	24,53
Brazlândia*	42.353	5,09	49.418	5,79	51.121	5,41	51.816	5,20	53.534	5,79	5,46
Norte	305.961	100	315.115	100	354.964	100	362.229	100	331.726	100	
Sobradinho*	57.870	18,91	59.024	18,73	63.715	17,95	62.763	17,33	60.077	18,11	18,21
Planaltina*	157.765	51,56	161.812	51,35	185.375	52,22	190.495	52,59	177.492	53,51	52,25
Sobradinho II*	82.959	27,11	94.279	29,92	97.466	27,46	100.683	27,80	85.574	25,80	27,62
Fercal*	73.67	2,41	-	-	8.408	2,37	8.288	2,29	8.583	2,59	2,41
Leste	188.448	100	200.436	100	230.137	100	238.620	100	269.446	100	
Paranoá	38.971	20,68	42.427	21,17	46.233	20,09	44.975	18,85	65.533	24,32	21,02
São Sebastião*	76.707	40,70	77.793	38,81	98.908	42,98	99.525	41,71	115.256	42,78	41,40
Jardim Botânico	22.579	11,98	23.856	11,90	25.302	10,99	26.882	11,27	26.449	9,82	11,19
Itapoã	50.191	26,63	56.360	28,12	59.694	25,94	67.238	28,18	62.208	23,09	26,39

Localidade - UPT - RA	População Urbana										% médio da participação relativa de cada RA
	2010	2010 (%)	2011	2011 (%)	2013	2013 (%)	2015	2015 (%)	2018	2018 (%)	
Sul	398.779	100	408.725	100	436.100	100	458.285	100	477.049	100	
Gama	125.260	31,41	127.475	31,19	134.958	30,95	134.111	29,26	132.466	27,77	30,12
Santa Maria	117.629	29,50	119.444	29,22	122.721	28,14	125.559	27,40	128.882	27,02	28,26
Recanto das Emas	121.482	30,46	124.755	30,52	138.997	31,87	146.906	32,06	130.043	27,26	30,43
Riacho Fundo II	34.408	8,63	37.051	9,07	39.424	9,04	51.709	11,28	85.658	17,96	11,19
TOTAL DF	4.963.368		2.556.149		2.786.686		2.906.574		2.881.854		

* Essas RAs não integram o escopo dessa pesquisa.

Em seguida, projetou-se a população urbana até o ano de 2059 das 25 RAs que integram a área de estudo dessa pesquisa, por meio do produto entre a projeção anual da população urbana de sua respectiva UPT (Apêndice E) e o percentual médio de participação relativa da RA na população da UPT (Tabela 4.20), cujos resultados são apresentados no Apêndice F.

Para fins de validação do procedimento adotado nessa pesquisa, comparou-se a projeção populacional aqui obtida com a projeção populacional estimada no PDSB (GDF, 2017b) (Tabela 4.21).

Tabela 4.21 - Comparação da projeção populacional obtida nessa pesquisa com a projeção populacional estimada no PDSB (GDF, 2017b).

Mês de referência	Projeção Populacional - Dissertação	Projeção Populacional - PDSB (GDF, 2017b)	Diferença Percentual
jan/2020	2.443.665	2.535.921	3,64%
jan/2021	2.476.130	2.578.268	3,96%
jan/2022	2.508.004	2.618.603	4,22%
jan/2023	2.539.218	2.658.896	4,50%
jan/2024	2.569.722	2.697.074	4,72%
jan/2025	2.599.481	2.735.173	4,96%
jan/2026	2.628.472	2.770.837	5,14%
jan/2027	2.656.666	2.806.312	5,33%
jan/2028	2.684.028	2.839.270	5,47%
jan/2039	2.710.539	2.872.112	5,63%
jan/2030	2.736.187	2.902.226	5,72%
jan/2031	2.761.017	2.931.030	5,80%
jan/2032	2.785.060	2.956.907	5,81%
jan/2033	2.808.303	2.982.693	5,85%
jan/2034	2.830.735	3.005.365	5,81%
jan/2035	2.852.338	3.027.984	5,80%
jan/2036	2.873.075	3.047.312	5,72%
jan/2037	2.892.911	3.066.636	5,66%

Observa-se, na Tabela 4.21, que tal comparação foi efetuada até o ano de 2037 (termo final do horizonte de planejamento do referido plano). Os resultados apresentados correspondem ao somatório das projeções anuais referentes às 25 regiões administrativas que integram o escopo dessa pesquisa. Observa-se que as diferenças percentuais entre as populações anuais das duas projeções são bastante razoáveis, todas inferiores a 6%, o que corrobora a qualidade satisfatória do procedimento adotado nessa pesquisa.

c) Desmembramento da projeção populacional urbana de cada RA na escala semanal

As projeções populacionais anuais de cada RA foram desmembradas na escala semanal ao longo de todo o horizonte de projeção populacional para fins de adaptação aos requisitos do sistema WaterPaths. Inicialmente, calculou-se a taxa de crescimento anual (A) entre anos consecutivos e a taxa de crescimento semanal (S) para cada RA, por meio das Equações 4.11 e 4.12, respectivamente.

$$A = \frac{P(y) - P(y - 1)}{P(y - 1)} \quad (\text{Equação 4.11})$$

$$S = (1 + A)^{\left(\frac{1}{52}\right)} - 1 \quad (\text{Equação 4.12})$$

Em que:

- $P(y)$ = população urbana no ano y ;
- $P(y - 1)$ = população urbana no ano $y - 1$.

Desse modo, a população da semana 1 do ano y é obtida por meio do produto entre a população da última semana do ano $y - 1$ e da taxa de crescimento semanal S . A população da semana 2 corresponde ao produto entre a população da semana 1 e da taxa de crescimento semanal S . E dessa forma procedeu-se ao cálculo da população de cada uma das 52 semanas do ano y , em que $2018 < y < 2059$.

2) Cálculo do consumo per capita semanal médio de cada RA

Conforme descrito no início do tópico 4.2.1.3, assumiu-se a hipótese de que o consumo per capita da população se manteria constante ao longo de todo o horizonte de simulação para fins de simplificação.

Os procedimentos para obtenção do consumo per capita semanal médio foram executados a partir da série de consumo per capita médio por RA utilizada no PDSB (GDF, 2017b), cuja

extensão é de três anos, compreendendo o período de julho de 2013 a junho de 2016 (Apêndice B). Ressalta-se que esses dados não englobam as perdas ocasionadas na distribuição de água.

Dado que a série de consumo per capita médio por RA utilizada no PDSB (GDF, 2017b) era mensal, foi necessário desagregá-la na escala semanal. Para tanto, assumiu-se um consumo semanal constante dentro de cada mês.

Em seguida, foram calculadas as per capitas semanais médias do período de julho de 2013 a junho de 2016 para cada RA. Nesse caso, considerou-se a primeira semana do mês de janeiro como semana 1 e a última semana do mês de dezembro como semana 52. Desse modo, o consumo per capita semanal médio foi obtido por meio do cálculo da média aritmética entre as semanas equivalentes de cada ano. Por exemplo, a per capita média da semana 1 corresponde à média aritmética dos valores de per capita da semana 1 dos anos de 2014, 2015 e 2016. A per capita média da semana 52 corresponde ao resultado da média aritmética entre os valores de per capita da semana 52 dos anos de 2013, 2014 e 2015. E assim procedeu-se com o cálculo da per capita média das demais semanas.

A série de consumo per capita semanal médio obtida para cada uma das RAs, cuja extensão é de 52 semanas (um ano), foi considerada constante para todo o horizonte de simulação (2086 semanas), conforme a hipótese assumida. Desse modo, cada RA apresenta os mesmos 52 valores de per capita semanal para todos os 40 anos do horizonte de simulação.

3) Obtenção da série de demanda de referência para cada companhia de saneamento

Os procedimentos descritos acima possibilitaram a obtenção, para cada RA, de uma única série de projeção populacional semanal e de consumo per capita semanal médio. Desse modo, multiplicou-se a série de consumo per capita semanal médio das RAs (composta por 52 semanas, ou seja, 1 ano) por cada um dos 40 anos de suas respectivas séries de projeção populacional, o que resultou na estimativa da demanda semanal futura de cada RA.

Posteriormente, as séries de demanda de água de cada RA foram somadas e agregadas em dois grupos, de acordo com a companhia à qual pertencem: 1) regiões administrativas atendidas pelo Sistema Torto/Santa Maria, ou seja, pela companhia CAESB_TSM (Brasília, Sudoeste/Octogonal, Cruzeiro, Lago Norte, Lago Sul, Paranoá, Varjão, Itapoã, Jardim Botânico, Guará, SIA e SCIA/Estrutural); e 2) regiões administrativas atendidas pelo

Sistema Descoberto, ou seja, pela companhia CAESB_DESC (Taguatinga, Ceilândia, Samambaia, Riacho Fundo, Riacho Fundo II, Recanto das Emas, Águas Claras, Santa Maria, Núcleo Bandeirante, Park Way, Candangolândia, Gama e Vicente Pires). Portanto, restaram apenas duas séries de demanda, uma para cada companhia.

Em seguida, aplicou-se sobre ambas as séries um percentual de perdas constante. Tal consideração é importante, dados os elevados índices de perda registrados na distribuição de água do DF, conforme apontam indicadores de desempenho da CAESB. Nessa pesquisa, o percentual aplicado foi de 32,7%, cujo valor corresponde à média dos índices de perdas dos anos anteriores (2011 a 2018), evidenciados na Tabela 4.22. As perdas, portanto, são consideradas um tipo de demanda, dado que a produção de água das companhias deve computar a parcela de água efetivamente consumida e a parcela de água perdida.

Tabela 4.22 – Índices de perdas na distribuição de água.
Fonte: Relatório de Indicadores de Desempenho (CAESB, 2019b).

Ano	Índice de Perdas na Distribuição (%)
2011	29,59
2012	29,01
2013	31,52
2014	33,38
2015	35,19
2016	35,21
2017	33,74
2018	34,49
Média do Período	32,70

As séries de demanda resultantes da aplicação do percentual de perdas são aqui designadas como demandas de referência, as quais foram utilizadas como base para geração das outras 999 séries referentes a cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM). No item 5.3, é apresentado o resultado das demandas de referência na escala anual.

Sugere-se que trabalhos futuros utilizem funções decrescentes para projetar as perdas de água ao longo do horizonte simulado, tendo em vista que a CAESB desenvolve um amplo trabalho de gestão de perdas no DF por meio do controle operacional e de vazamentos, da melhoria da medição e da infraestrutura de distribuição e do combate a fraudes e ligações clandestinas (CAESB, 2019e). No Relatório da Administração de 2019 da CAESB (CAESB, 2019e), é apresentada, inclusive, uma projeção de curva de redução do volume de perdas da companhia (reais e aparentes), reduções estas amparadas no programa de investimentos do BID e relacionadas às ações de setorização (implementação de Distritos de Medição e

Controle – DMC – e ajuste de pressão da rede de distribuição), de controle ativo de vazamentos e de melhoria no parque de hidrômetros.

4) Geração das 1.000 séries de demanda para cada companhia de saneamento

No tópico anterior, obteve-se uma única série de demanda de água para cada companhia, denominadas de demanda de referência ($D_{R,j}$). Todavia, dado que a plataforma WaterPaths possui como requisito a inserção de 1.000 séries de demanda de água, faz-se necessária a geração de outras 999 séries.

Nesse sentido, as demais 999 séries de demanda foram obtidas de acordo com a expressão evidenciada na Equação 4.13.

$$DI(w)_{d,j} = [DI_{R,j}(w) - DI_{R,j}(1)] * Z + DI_{R,j}(1) \quad (\text{Equação 4.13})$$

Em que:

- w = número da semana ($1 \leq w \leq 2086$);
- d = número de identificação da nova série de demanda ($1 \leq d \leq 999$);
- j = identificação da companhia de abastecimento (CAESB_DESC e CAESB_TSM);
- $DI(w)_{d,j}$ = demanda da semana w pertencente à série de demanda d da companhia j ;
- $DI_{R,j}(w)$ = demanda da semana w pertencente à projeção de referência da companhia j ;
- $DI_{R,j}(1)$ = demanda da semana 1 pertencente à projeção de referência da companhia j ;
- $DI(1)_{d,j} = DI_{R,j}(1)$;
- Z = escalar aleatório gerado entre 0,75 e 2,0.

Os escalares aleatórios Z incidem sobre a diferença entre a demanda da semana w e da semana 1 da projeção de referência, de modo a representar a incerteza associada ao comportamento dessa variável. Tais escalares foram gerados pelo método *Latin Hypercube Sampling* (LHS), ou Amostragem Hiper-cubo Latino, proposto inicialmente por McKay *et al.* (1979). O LHS corresponde a uma técnica de amostragem de variáveis aleatórias, realizada a partir da estratificação do domínio das variáveis em intervalos de igual probabilidade, denominados de estratos. Esse método conduz à seleção aleatória, por estrato, de um ponto da amostra, de modo a evitar que todos os pontos advenham de uma mesma região do espaço amostral. Dessa forma, garante-se uma cobertura mais homogênea do espaço amostral, o qual registra um ponto por estrato (Viana, 2015).

Nesse sentido, foram gerados 999 escalares distintos compreendidos entre o intervalo de 0,75 e 2,0. Esses extremos do intervalo foram definidos de acordo com os limites mínimo e máximo, estipulados nessa pesquisa, de variação da demanda de referência, os quais são 95% e 120%, respectivamente. Tem-se, portanto, que os escalares Z proporcionam, ao final do horizonte simulado, uma redução de até 5% e um aumento de até 20% sobre a demanda da projeção de referência.

Tais escalares foram aplicados de acordo com a Equação 4.13, a fim de gerar as outras 999 séries de demanda distintas para cada uma das companhias de saneamento (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

4.2.1.4 – Amostragem dos fatores de incerteza profunda

A inclusão de fatores de incerteza profunda nos cenários a serem simulados tem por objetivo proporcionar a concepção de políticas de abastecimento urbano que apresentem bom desempenho sob ampla gama de estados futuros do mundo, de modo a submeter a maiores graus de dificuldade e perturbação a avaliação das funções objetivo (Trindade *et al.*, 2017). Ademais, as incertezas profundas estão presentes em sistemas complexos e não possuem tratamento definido em termos de formulação matemática. A inclusão dessas incertezas nos cenários permite, portanto, a representação mais próxima da complexidade do contexto de operação do sistema no horizonte de longo prazo, possibilitando que políticas sejam avaliadas sob situações adversas e algumas vezes extremas.

Conforme abordado no item 4.1.2.1, os 1.000 cenários explorados nessa pesquisa contêm multiplicadores escalares, também denominados de amostras, referentes aos sete fatores de incerteza profunda. Tais multiplicadores, obtidos de acordo com a expressão matemática apresentada na Equação 4.14, constituem vetores de incerteza profunda, em que cada vetor é composto por sete multiplicadores escalares (um correspondente a cada fator):

$$\mathcal{D}(i, s) = \prod_{f=0}^{N_{IP}} \mathcal{U}(i_f, s_f), \quad (\text{Equação 4.14})$$

Onde $\mathcal{D}(i, s)$ é a função densidade de probabilidade correspondente à distribuição uniforme \mathcal{U} assumida para os fatores de incerteza profunda, N_{IP} representa a quantidade de fatores de incerteza profunda ($N_{IP} = 7$), enquanto i_f e s_f correspondem aos limites inferiores e superiores atribuídos a cada fator de incerteza f . No caso dessa pesquisa, utilizou-se o

método LHS implementado no pacote Python pyDOE para gerar os 1.000 multiplicadores escalares referentes a cada fator de incerteza profunda, compreendidos entre os respectivos limites i_f e s_f , apresentados na Tabela 4.23.

No presente trabalho, os valores limites dos multiplicadores escalares foram definidos a partir da análise de situações já vivenciadas no contexto da CAESB. Reconhece-se que os referidos limites podem ser objeto de consulta a especialistas com metodologias próprias para tal finalidade. No entanto, tal procedimento demanda um tempo considerável e não constitui foco dessa dissertação. Ainda assim, recomenda-se que, em trabalhos futuros, essa metodologia seja refinada. Nessa pesquisa, tais limites foram definidos da seguinte forma:

- Taxa de juros: adotou-se margem de variação compreendida entre 70% e 190% sobre o valor de referência da taxa de juros (7%), a fim de abarcar índices praticados por instituições distintas, bem como possíveis oscilações de cunho econômico (inflação, etc);
- Período de amortização: adotou-se margem de variação compreendida entre 90% e 130% sobre o valor de referência do período de amortização (20 anos), dado que tais prazos dependem dos valores dos empréstimos e das instituições com as quais se adquirem os empréstimos. O limite superior foi mais flexibilizado em razão de tais empréstimos, geralmente elevados, demorarem a ser amortizados;
- Taxa de desconto: adotou-se margem de variação compreendida entre 80% e 180% sobre o valor de referência da taxa de desconto (4%), tendo em vista os diferentes índices utilizados para a correção das parcelas dos empréstimos efetuados (índices menores) e das receitas da companhia, para as quais os índices aplicados são maiores;
- Tarifa de água e esgoto: adotou-se margem de variação compreendida entre 102% e 110% sobre os valores de referência de cada categoria, dado que alguns anos passados apresentaram percentuais de aumento pequenos, enquanto outros apresentaram percentuais mais elevados, superiores a 10% (vide Tabela 4.7);
- Eficácia dos estágios de restrição de uso da água: adotou-se uma margem de variação de 80% a 120% sobre os percentuais de restrição de cada estágio, dado que tais medidas podem surtir efeitos maiores à medida que a população adquire consciência, porém também menores no caso de ocorrências infrequentes de secas, situação em que a população está acostumada a ter água em abundância;
- Prazo para obtenção da licença: atribuiu-se margem de variação entre 60% e 140% sobre o prazo estimado para obtenção da licença referente à implantação da etapa 3 do Sistema

Corumbá (5 anos), dado que essa etapa pertence a um projeto já em andamento, porém ainda sem previsão de ser implementada;

- **Custo de construção:** quanto ao custo de construção das novas infraestruturas, assumiu-se que os valores de referência não serão menores no futuro, apenas maiores. Nesse caso, adotou-se um percentual de variação de até 130% sobre esses valores, a fim de abarcar oscilações de cunho econômico (inflação, etc).

Tabela 4.23 – Fatores de incerteza profunda e respectivos intervalos de amostragem aplicados.

Fator de Incerteza Profunda	Valor de referência		Limite Inferior (i_f)	Limite Superior (s_f)
Taxa de juros (%)	7		0,7	1,9
Período de amortização (anos)	20		0,9	1,3
Taxa de desconto (%)	4		0,8	1,8
Tarifa de água e esgoto (R\$/m ³)	Residencial	4,43	1,02	1,1
	Comercial	13,08		
	Industrial	12,02		
	Pública	13,08		
	Esgoto	4,80		
Eficácia dos estágios de restrição de uso da água (%)	1° estágio	2	0,8	1,2
	2° estágio	4		
	3° estágio	14		
Prazo para obtenção da licença (anos)	Corumbá – 1ª etapa	0	-	-
	Corumbá – 2ª etapa	0	-	-
	Corumbá – 3ª etapa	5	0,6	1,4
	Elevação do nível d'água da barragem do Descoberto	0	-	-
	Paranoá – 1ª etapa	0	-	-
	Paranoá – 2ª etapa	0	-	-
	Paranoá – 3ª etapa	0	-	-
Custo de construção (Em milhões de reais)	Corumbá – 1ª etapa	276,5	1,0	1,3
	Corumbá – 2ª etapa	222,1		
	Corumbá – 3ª etapa	251,4		
	Elevação do nível d'água da barragem do Descoberto	7,5		
	Paranoá – 1ª etapa	60,3		
	Paranoá – 2ª etapa	60,3		
	Paranoá – 3ª etapa	60,3		

4.2.2 – Identificação e análise das políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF

Essa etapa consiste na efetiva aplicação do modelo de simulação estocástica WaterPaths (acoplado ao algoritmo evolucionário multiobjetivo Borg MS) para identificação dos conjuntos de variáveis de decisão (políticas) que retornam soluções não dominadas.

Tendo em vista que as companhias de saneamento nacionais geralmente não utilizam instrumentos de mitigação financeira (como fundos de contingência e contratos de seguro), optou-se por executar a otimização sob duas formulações distintas do portfólio de gestão e planejamento do SAAU do DF. A primeira, designada como formulação I, inclui contribuições anuais a um fundo de contingência, ao passo que a segunda, designada como formulação II, não. Nesse sentido, é possível verificar se a adoção dessa estratégia proporciona maior estabilidade financeira às companhias de saneamento por meio da análise das funções objetivo de custo anual médio (CAM) e custo do pior primeiro percentil (CPPP).

Tem-se, portanto, que as políticas de abastecimento urbano obtidas a partir da formulação I (modelo com fundo de contingência) são constituídas por variáveis de decisão atreladas ao instrumento de mitigação financeira (fundo de contingência), às ações operacionais de curto prazo (restrições e transferências) e aos investimentos de longo prazo em obras de ampliação da infraestrutura de oferta, ao passo que as políticas obtidas a partir da formulação II (modelo sem fundo de contingência) carecem de instrumentos de mitigação financeira.

Integram essa etapa metodológica a formulação do problema de otimização, a amostragem de cenários e o experimento computacional realizado, os quais serão detalhados nos tópicos a seguir (4.2.2.1, 4.2.2.2 e 4.2.2.3).

4.2.2.1 – Formulação do problema de otimização

A formulação matemática do problema de otimização multiobjetivo dessa pesquisa, a ser solucionado pelo otimizador Borg acoplado ao modelo de simulação estocástica WaterPaths, é apresentada a seguir. De modo geral, o otimizador identificará as melhores políticas (estratégias de ações operacionais de curto prazo e de investimentos de longo prazo em infraestruturas de abastecimento urbano), denotadas como θ^* , para as companhias de saneamento. Tais políticas, correspondentes à Frente de Pareto, devem minimizar o vetor de função objetivo F (Equação 4.15):

$$\theta^* = \operatorname{argmin}_{\theta} \mathbf{F} \quad (\text{Equação 4.15})$$

Em que:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -f_{CONF}(x_s, \theta_{gr}, \theta_{\Delta gr}, \theta_{gt}, \theta_{ci}, OCI, \psi_s) \\ f_{FR}(x_{rdfCP}, \theta_{gr}, \theta_{\Delta gr}, \theta_{gt}, \theta_{ci}, OCI, \psi_s) \\ f_{IVPL}(x_{rdfLP}, \theta_{ci}, OCI, \psi_s) \\ f_{CAM}(x_{rdfCP}, \theta_{gr}, \theta_{\Delta gr}, \theta_{gt}, \theta_{cafc}, x_{rdfLP}, \theta_{ci}, OCI, \psi_s) \\ f_{CPPP}(x_{rdfCP}, \theta_{gr}, \theta_{\Delta gr}, \theta_{gt}, \theta_{cafc}, x_{rdfLP}, \theta_{ci}, OCI, \psi_s) \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 4.16})$$

Onde:

$$X = \begin{bmatrix} x_{rdfCP} \\ x_{rdfLP} \\ x_s \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 4.17})$$

$$\theta = [\theta_{gr}, \theta_{\Delta gr}, \theta_{gt}, \theta_{cafc}, \theta_{ci}, OCI] \quad (\text{Equação 4.18})$$

$$\psi_s = \left\{ \begin{bmatrix} \psi_{vaz\tilde{a}o,1} \\ \psi_{vaz\tilde{a}o,2} \\ \vdots \\ \psi_{vaz\tilde{a}o,1000} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \psi_{evapora\tilde{c}\tilde{a}o,1} \\ \psi_{evapora\tilde{c}\tilde{a}o,2} \\ \vdots \\ \psi_{evapora\tilde{c}\tilde{a}o,1000} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \psi_{demanda,1} \\ \psi_{demanda,2} \\ \vdots \\ \psi_{demanda,1000} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \psi_{IP,1} \\ \psi_{IP,2} \\ \vdots \\ \psi_{IP,1000} \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{Equação 4.19})$$

Na Equação 4.16, o vetor \mathbf{F} é composto pelas cinco funções objetivo listadas abaixo, cujas respectivas equações matemáticas estão descritas no item 3.4.6:

- f_{CONF} (max) = avalia a confiabilidade do sistema de abastecimento;
- f_{FR} (min) = avalia a frequência de implementação de restrição de uso da água;
- f_{IVPL} (min) = avalia o valor presente líquido do custo relacionado às infraestruturas construídas;
- f_{CAM} (min) = avalia o custo anual médio (ou custo anual esperado) da companhia, associado aos pagamentos de empréstimos efetuados, aos instrumentos de mitigação das secas e à manutenção do fundo de contingência; e
- f_{CPPP} (min) = função objetivo que avalia o primeiro percentil dos anos de maiores custos associados às ações operacionais de curto prazo (restrições e transferências de água).

No âmbito do estudo de caso dessa pesquisa, constituído por duas companhias de saneamento, o problema de otimização de cada uma das formulações I e II seria composto

por 10 funções objetivo caso se optasse por otimizá-las de modo individual. Tal quantidade elevada de objetivos pode prejudicar o desempenho do algoritmo de otimização e até mesmo tornar o problema intratável. Uma estratégia eficaz de redução dimensional pode ser alcançada por meio da adoção de objetivos de caráter regional. Nesse sentido, para cada um dos cinco objetivos, o processo de otimização retornará o valor referente à companhia de pior desempenho (Equações 3.5, 3.7, 3.9, 3.11, 3.13), de modo a garantir que a outra companhia tenha apresentado performance igual ou superior àquela.

Na Equação 4.17, X corresponde à matriz de “estados variáveis no tempo” associada a cada companhia, cujos vetores x_{rdfCP} e x_{rdfLP} representam os valores das métricas de risco de falha de curto e longo prazo, respectivamente, enquanto x_s representa a disponibilidade hídrica (volume total combinado) da companhia.

θ (Equação 4.18) corresponde ao conjunto de vetores das variáveis de decisão que caracterizam as políticas de abastecimento, cujos valores são otimizados para fins de identificação das melhores relações de troca entre as funções objetivo do vetor F (políticas ótimas da Frente de Pareto – θ^*). Compõem esse vetor as seguintes variáveis de decisão:

- θ_{gr} = vetor de gatilhos de restrição de uso da água;
- $\theta_{\Delta gr}$ = vetor de gatilhos de restrição mais severa de uso da água (estágios 2 e 3);
- θ_{gt} = vetor de gatilhos de transferência de água;
- θ_{ci} = vetor de gatilhos de construção de infraestruturas;
- OCI = matriz com os vetores que armazenam a ordem de construção das infraestruturas de cada companhia;
- θ_{cafc} = vetor de contribuições anuais ao fundo de contingência, estabelecidas como uma porcentagem da receita anual de cada companhia. Observa-se que os portfólios de abastecimento da formulação II são desprovidos de instrumentos de mitigação financeira e, portanto, a variável θ_{cafc} não integra o problema de otimização de tais portfólios.

Por fim, tem-se que a matriz ψ_s (Equação 4.19) é composta pelos vetores com as séries temporais das incertezas bem-caracterizadas (vazão, taxa de evaporação e demanda) – ψ_{IBC} – e com os multiplicadores escalares dos fatores de incerteza profunda (Tabela 4.23) – ψ_{IP} .

Os limites inferior e superior atribuídos às variáveis de decisão que compõem o estudo de caso dessa pesquisa (θ_{gr} , $\theta_{\Delta gr}$, θ_{gt} , θ_{ci} , OCI , θ_{cafc}) são apresentados nas Tabelas 4.24 a

4.26. Observa-se que valores de 1,0 (100%) foram aceitos como possíveis limiares do RdF de curto prazo para o desencadeamento de restrições e transferências por parte de cada companhia. A lógica associada a essa escolha reside no fato de que o propósito desse estudo não consiste em simplesmente fornecer às companhias de saneamento valores precisos dos limiares de RdF a serem implementados; busca-se, na realidade, proporcionar estratégias diversificadas, de modo que a obtenção de um valor próximo a 1,0 para o gatilho de restrição sirva como um indicador de que outras alternativas devem ser exploradas, a fim de que as companhias não se apoiem demasiadamente nessa única estratégia.

Tabela 4.24 - Variáveis de decisão associadas às estratégias de curto prazo de gestão das secas – restrições de uso da água, transferências de água e fundo de contingência – para cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

Variável de Decisão	Limite Inferior	Limite Superior
Gatilho de restrição de uso da água para CAESB_DESC - θ_{gr}	0,1%	100%
Gatilho de restrição de uso da água para CAESB_TSM - θ_{gr}	0,1%	100%
Gatilho de restrição mais severa de uso da água para CAESB_DESC - $\theta_{\Delta gr}$	0,1%	100%
Gatilho de restrição mais severa de uso da água para CAESB_TSM - $\theta_{\Delta gr}$	0,1%	100%
Gatilho de transferência de água para CAESB_DESC - θ_{gt}	0,1%	100%
Gatilho de transferência de água para CAESB_TSM - θ_{gt}	0,1%	100%
Contribuição anual ao fundo de contingência (definida como uma porcentagem da receita anual da companhia CAESB_DESC) - θ_{cafc}^*	0%	10%
Contribuição anual ao fundo de contingência (definida como uma porcentagem da receita anual da companhia CAESB_TSM) - θ_{cafc}^*	0%	10%

* No caso da formulação II do portfólio de abastecimento, θ_{cafc} equivale a zero.

Tabela 4.25 - Variáveis de decisão associadas ao RdF de longo prazo, que funcionam como limiares para desencadear a construção de infraestrutura por cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

Variável de Decisão	Limite Inferior	Limite Superior
Gatilho para a construção de infraestrutura associado à CAESB_DESC - θ_{ci}	0,1%	100%
Gatilho para a construção de infraestrutura associado à CAESB_TSM - θ_{ci}	0,1%	100%

Tabela 4.26 - Variáveis de decisão responsáveis por determinar a ordem de construção das infraestruturas pertencentes a cada companhia (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

	Variável de Decisão	Limite Inferior	Limite Superior
CAESB_DESC	Ordem de construção do Sistema Corumbá (1ª Etapa) - <i>OCI</i>	1ª	4ª
	Ordem de construção do Sistema Corumbá (2ª Etapa) - <i>OCI</i>	1ª	4ª
	Ordem de construção do Sistema Corumbá (3ª Etapa) - <i>OCI</i>	1ª	4ª
	Ordem de construção da elevação do nível d'água da barragem do Descoberto - <i>OCI</i>	1ª	4ª
CAESB_TSM	Ordem de construção do Sistema Paranoá (1ª Etapa) - <i>OCI</i>	1ª	3ª
	Ordem de construção do Sistema Paranoá (2ª Etapa) - <i>OCI</i>	1ª	3ª
	Ordem de construção do Sistema Paranoá (3ª Etapa) - <i>OCI</i>	1ª	3ª

Estabeleceu-se também a precisão da métrica de ε -dominância, relacionada ao algoritmo de otimização Borg MS, para cada função objetivo (Tabela 4.27). Tal métrica é responsável por definir a resolução do conjunto de soluções identificadas e garantir convergência à Frente de Pareto aproximada (Reed *et al.*, 2013).

Tabela 4.27 - Valores atribuídos à métrica de ε -dominância para cada função objetivo.

Objetivo	ε-dominância
Confiabilidade (f_{CONF})	0,001
Frequência de Restrição (f_{FR})	0,005
VPL do Custo de Infraestrutura (f_{IVPL})	10.000.000
Custo Anual Médio (f_{CAM})	0,002
Custo do Pior Primeiro Percentil (f_{CPPP})	0,005

4.2.2.2 – Amostragem de cenários para geração e avaliação das políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF

Todas as cinco funções objetivo apresentadas na seção 3.4.6 são estocasticamente avaliadas sob um conjunto de 1.000 cenários em uma estrutura de simulação Monte Carlo. Cada cenário é constituído por uma série temporal de cada incerteza bem-caracterizada (vazão, taxa de evaporação e demanda) e um vetor de sete incertezas profundas (ψ_{IP}).

O processo de constituição desses cenários no âmbito da estrutura de simulação Monte Carlo é evidenciado na Figura 4.8. Observa-se que cada conjunto de série temporal de vazão (Q), de taxas de evaporação (E) e de demanda (DI) é pareado aleatoriamente a um dos 1.000 vetores de amostras dos sete fatores de incerteza profunda (ψ_{IP}). Cada cenário é então composto pela combinação de incertezas cujas distribuições baseadas em registros históricos estão disponíveis (vazão, evaporação e demanda) e de incertezas profundas (vide Tabela 4.23), as quais não dispõem de tais distribuições.

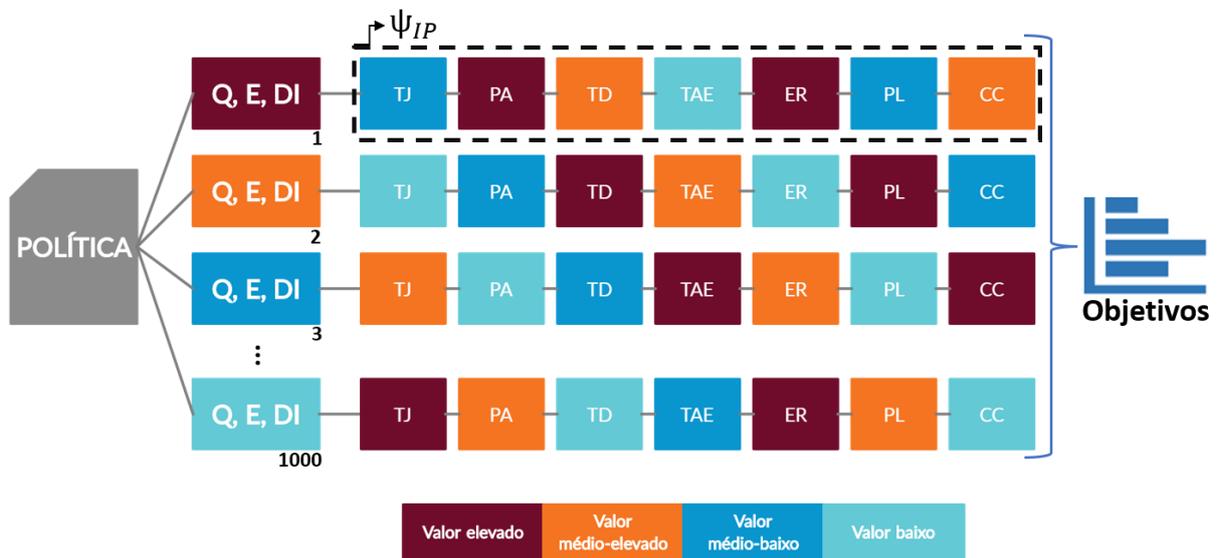


Figura 4.8 - Esquema de amostragem de cenários.

Cada conjunto de série temporal de vazão, de taxas de evaporação e de demanda (Q , E , DI) é acoplado, de modo aleatório, a uma das 1.000 projeções dos sete fatores de incerteza profunda (vetor ψ_{IP}).

As séries temporais de vazão (Q), de evaporação (E) e de demanda (DI) que integram os cenários estão dispostas em matrizes, cujas dimensões correspondem ao número de séries sintéticas geradas (1.000) e ao número total de semanas compreendidas no horizonte de planejamento dessa pesquisa (2086). O processo de obtenção de cada uma dessas matrizes foi descrito nos itens 4.2.1.1 a 4.2.1.3.

Quanto aos fatores de incerteza profunda, estes compõem 1.000 vetores de amostras distintas (ψ_{IP}) obtidas por meio do método LHS (vide item 4.2.1.4). Tais vetores são pareados de modo aleatório às séries temporais de vazão, evaporação e demanda. Assume-se, portanto, que os fatores de incerteza profunda não estão correlacionados às incertezas bem-caracterizadas, bem como não estão correlacionados entre si.

4.2.2.3 – Experimento computacional

Para a resolução do problema de otimização dessa pesquisa, adotou-se a estratégia de paralelização referente à versão Borg MS do algoritmo evolucionário multiobjetivo Borg (vide item 3.4.7).

Nesse trabalho, todas as rodadas de otimização foram executadas no The Cube Cluster, computador de alta performance pertencente ao Professor Patrick Reed da Universidade de Cornell, EUA, disponível no Centro de Computação Avançada da universidade. O The Cube Cluster é composto por 32 nós (computadores), cada qual com 16 núcleos distribuídos em dois processadores Intel-Xeon E5-2680 (Sandy Bridge), @ 2.7 GHz e 128 GB de memória RAM.

O processo de otimização deve ser avaliado quanto à qualidade da Frente de Pareto aproximada produzida pelo algoritmo. Busca-se avaliar o desempenho do otimizador com o intuito de verificar se a quantidade de rodadas de otimização executadas foi suficiente para garantir a convergência máxima das soluções, de modo que novas soluções geradas pelo otimizador já não apresentem ganho de performance em relação àquelas não dominadas identificadas anteriormente.

Para tanto, adotou-se o indicador de hipervolume, que consiste em uma medida do volume multidimensional do espaço dominado por um conjunto de soluções aproximadas de Pareto (Zitzler *et al.*, 2003). À medida que o valor da métrica aumenta, o grau de convergência das soluções também aumenta. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 4.9 o hipervolume (área sombreada) do conjunto de soluções A , determinado a partir de um ponto de referência (x, y) , em um problema de minimização com duas funções objetivo (f_1 e f_2).

Nessa pesquisa, o cálculo da métrica de hipervolume foi realizado a partir da ferramenta computacional *MOEA Framework* (Hadka, 2015), biblioteca gratuita que possibilita realizar uma série de operações com algoritmos de otimização.

Dado que o Borg MS é um algoritmo de otimização estocástica, cujo processo de busca depende do número aleatório utilizado para inicializar a população e gerar novas soluções, optou-se por executar, para cada uma das formulações do portfólio de abastecimento, rodadas de otimização com quatro diferentes inicializações (números aleatórios). Desse

modo, controla-se o grau de variabilidade das soluções e avalia-se a consistência do processo de busca.

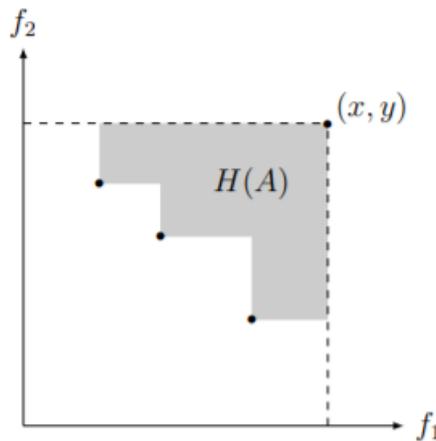


Figura 4.9 - Exemplo da aplicação do hipervolume.
Fonte: Rego (2013).

Cada uma das quatro inicializações fornece a sua respectiva Frente de Pareto (conjunto com as melhores soluções). A partir da ferramenta computacional *MOEA Framework* (Hadka, 2015), é gerado um conjunto único, designado como conjunto de referência, com a seleção das melhores soluções dentre aquelas contidas nas Frentes de Pareto obtidas por cada uma das quatro inicializações individualmente. As políticas de abastecimento urbano analisadas nessa pesquisa (de modo mais específico, no capítulo 6) foram retiradas desse conjunto de referência.

Ao analisar a evolução da métrica de hipervolume (Figura 4.10 e 4.11) para as formulações I e II (com e sem fundo de contingência, respectivamente), observou-se que, nesse estudo, cada inicialização aleatória deixou de expandir a sua região dominada após 35.000 avaliações do modelo, encontrando cada uma aproximadamente 57% (formulação I) e 22% (formulação II) da região dominada conjunta. A estabilização da curva de hipervolume indica que todas as inicializações convergiram para a sua melhor aproximação após cerca de 35.000 avaliações do modelo, ao passo que a sobreposição das quatro curvas demonstra que a quantidade de inicializações aleatórias avaliadas (quatro) foram suficientes para assegurar consistência. Por fim, observa-se que o hipervolume foi calculado a cada 1.000 avaliações do modelo para cada uma das inicializações aleatórias, conforme apresentado nas Figuras 4.10 e 4.11, e que os respectivos resultados obtidos foram normalizados (divididos pelos valores de hipervolume correspondentes ao conjunto de referência).

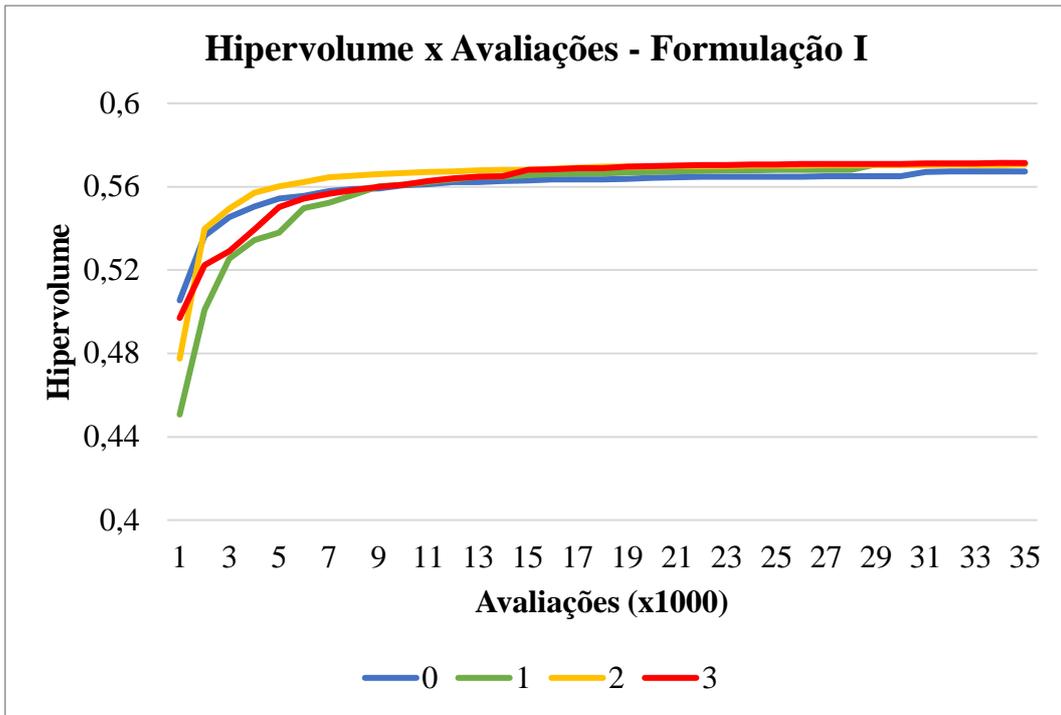


Figura 4.10 - Evolução do hiper-volume para cada uma das quatro inicializações aleatórias – Formulação I (modelo com fundo de contingência).

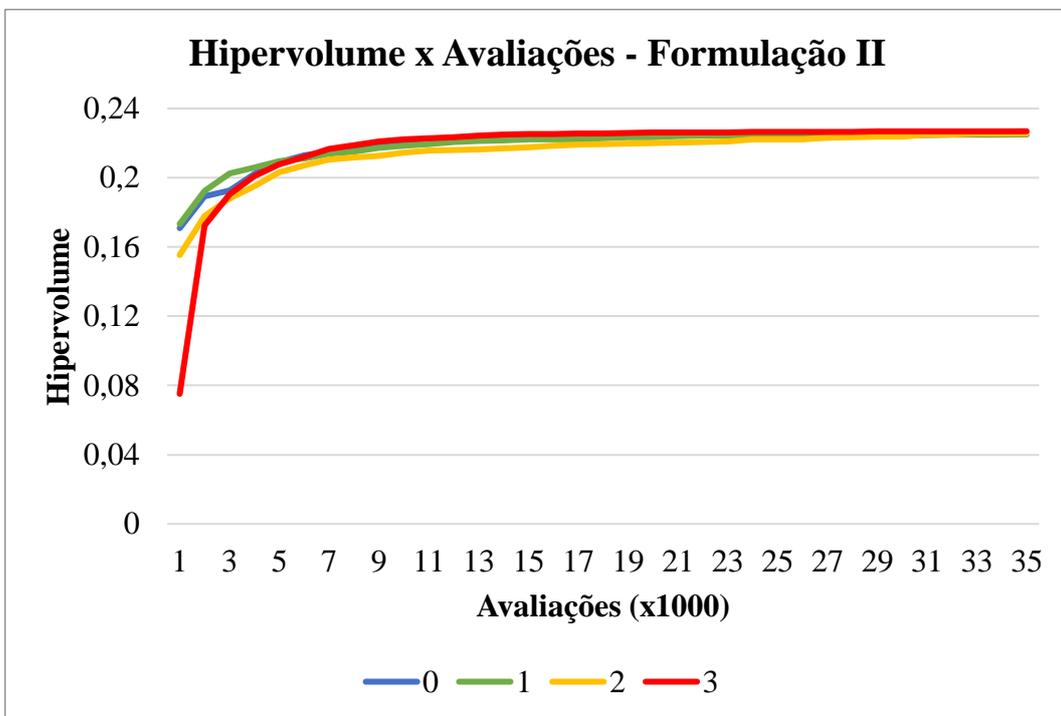


Figura 4.11 - Evolução do hiper-volume para cada uma das quatro inicializações aleatórias – Formulação II (modelo sem fundo de contingência).

As rodadas de otimização referentes à formulação I e II do portfólio de abastecimento foram executadas em 12 computadores do The Cube Cluster. Estas foram distribuídas entre 36 instâncias (cada uma com 5 processadores), de modo que uma delas operou como o processo mestre e as demais, como processos trabalhadores (vide item 3.4.7). Desse modo, 35 rodadas

de otimização são conduzidas simultaneamente. Cada avaliação do modelo (executada pelo processo trabalhador) verifica a performance de uma política específica sob 1.000 cenários distintos. Estes, por sua vez, são simulados em paralelo nos 5 processadores alocados para cada instância.

Em síntese, tem-se que a paralelização das rodadas de otimização em 35 instâncias ocorre via memória distribuída e está relacionada à estratégia adotada pelo algoritmo de otimização Borg MS, ao passo que a paralelização da simulação dos cenários dentro de cada instância (processo trabalhador) ocorre via memória compartilhada e está relacionada às configurações do WaterPaths.

5. SÉRIES TEMPORAIS SINTÉTICAS

Neste capítulo, são apresentados os resultados das séries sintéticas de vazão, de taxas de evaporação e de demanda geradas nessa pesquisa para comporem os cenários sob os quais a performance das políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF será avaliada.

As séries hidrológicas modeladas (seções 5.1 e 5.2) correspondem, respectivamente, às vazões naturais e às taxas de evaporação dos reservatórios do Descoberto, de Santa Maria, do Paranoá e de Corumbá IV. Observa-se que os ajustes dos modelos a tais séries ocorreram a partir de uma malha temporal de 90 anos, dado que os registros de determinadas séries históricas de vazão iniciam-se no ano de 1970 (vide Tabela 4.15) e que o horizonte de planejamento adotado nessa pesquisa possui extensão de 40 anos (2020 a 2059).

Por fim, tem-se que as séries de demanda de água (seção 5.3) foram geradas para cada companhia de saneamento (CAESB_DESC e CAESB_TSM).

5.1 – SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÃO

5.1.1 – Descoberto e Corumbá IV

Na Tabela 5.1, são apresentadas as estimativas obtidas mediante regressão linear de $\ln Q_w$ sobre D_w para a componente decenal \hat{D}_w dos modelos referentes às séries temporais das vazões afluentes aos reservatórios do Descoberto e de Corumbá IV. Para o primeiro, adotou-se como $w = 0$ a primeira semana do ano de 1985, enquanto para o segundo, adotou-se a primeira semana do ano de 2013, de acordo com os dados disponíveis.

Observa-se na Tabela 5.1 que quanto maior a *razão t*, em termos absolutos, mais distante ela estará da hipótese de o respectivo coeficiente estimado ser, na realidade, nulo. Desse modo, o coeficiente 0,085 não poderia ser arredondado para zero, dado que 0,085 é quase 4 vezes superior ao erro padrão (0,02181). O mesmo entendimento se aplica às demais estimativas de *razão t*. Os *p-valores* obtidos (inferiores a 0,05), por sua vez, indicam ser muito baixas as probabilidades de que as estimativas não nulas dos respectivos coeficientes tenham decorrido de um mero acaso estatístico.

Tabela 5.1 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente decenal (\hat{D}_w) referentes à modelagem das séries temporais da vazão afluyente ao reservatório do Descoberto e de Corumbá IV.

	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
Descoberto	1,594	0,01526	104,5	< 0,0001
	- 0,085	0,02181	- 3,88	0,0001
	- 0,097	0,02182	- 4,42	< 0,0001
	- 0,191	0,02162	- 8,83	< 0,0001
	0,132	0,02637	5,00	< 0,0001
	0,162	0,02596	6,26	< 0,0001
Corumbá IV	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	3,622	0,03553	101,95	< 0,0001
	0,227	0,05305	4,28	< 0,0001
	0,207	0,04716	4,41	< 0,0001

Após a estimativa da componente decenal, efetuou-se a regressão linear de $\ln Q_w - \hat{D}_w$ sobre S_w , de modo a obter a componente sazonal \hat{S}_w do modelo de decomposição correspondente a cada reservatório, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente sazonal (\hat{S}_w) referentes à modelagem das séries temporais da vazão afluyente ao reservatório do Descoberto e de Corumbá IV.

	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
Descoberto	0,165	0,01126	14,67	< 0,0001
	0,703	0,01127	62,39	< 0,0001
	0,082	0,01128	7,32	< 0,0001
	0,029	0,01125	2,54	0,0109
	0,070	0,01126	6,19	< 0,0001
Corumbá IV	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	- 0,432	0,03326	- 13,01	< 0,0001
	0,330	0,03273	10,10	< 0,0001
	- 0,070	0,03309	- 2,12	0,0350
	0,069	0,03389	2,10	0,0370

Quanto ao desvio padrão do erro aleatório, obteve-se a estimativa de $\hat{\sigma} = 0,32$ para o modelo representativo das séries temporais do reservatório do Descoberto e de $\hat{\sigma} = 0,35$ para Corumbá IV.

Por fim, foram geradas as séries sintéticas de vazão correspondentes aos anos de 1970 a 2059. No caso do reservatório do Descoberto, inicialmente produziu-se uma malha temporal com $w = -780, -779, \dots, 0, \dots, 3898, 3899$, na qual o ponto 0 representa a primeira semana do ano de 1985. Em seguida, foram gerados 4680 ruídos aleatórios com média nula e desvio padrão $\hat{\sigma} = 0,32$, aplicados posteriormente sobre o modelo de decomposição obtido (Tabela 5.3).

Quanto ao reservatório de Corumbá IV, produziu-se uma malha temporal com $w = -2236, -2235, \dots, 0, \dots, 2442, 2443$, na qual o ponto 0 representa a primeira semana do ano de 2013. Em seguida, foram gerados 4680 ruídos aleatórios (ε_w) com média nula e desvio padrão $\hat{\sigma} = 0,35$, aplicados posteriormente sobre o modelo de decomposição obtido (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Modelo de decomposição obtido para a vazão afluyente aos reservatórios do Descoberto e de Corumbá IV.

Reservatório	Modelo de Decomposição
Descoberto	$Q_w = \exp \left(1,594 - 0,085 \cos \frac{2\pi w}{10 \times 52} - 0,097 \operatorname{sen} \frac{2\pi w}{10 \times 52} \right. \\ - 0,191 \cos \frac{2\pi w}{15 \times 52} + 0,132 \cos \frac{2\pi w}{20 \times 52} \\ + 0,162 \cos \frac{2\pi w}{30 \times 52} + 0,165 \cos \frac{2\pi w}{52} \\ + 0,703 \operatorname{sen} \frac{2\pi w}{52} + 0,082 \cos \frac{4\pi w}{52} + 0,029 \operatorname{sen} \frac{4\pi w}{52} \\ \left. + 0,070 \cos \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Corumbá IV	$Q_w = \exp \left(3,622 + 0,227 \cos \frac{4\pi w}{10 \times 52} + 0,207 \operatorname{sen} \frac{4\pi w}{10 \times 52} \right. \\ - 0,432 \cos \frac{2\pi w}{52} + 0,330 \operatorname{sen} \frac{2\pi w}{52} - 0,070 \cos \frac{6\pi w}{52} \\ \left. + 0,069 \operatorname{sen} \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$

Desse modo, por meio dos modelos de decomposição obtidos (Tabela 5.3), foram geradas 1.000 séries sintéticas de vazões afluentes aos reservatórios do Descoberto e de Corumbá IV, cujos exemplos são apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente. As séries apresentadas se estendem por 2086 semanas, que correspondem aos 40 anos do horizonte de planejamento dessa pesquisa.

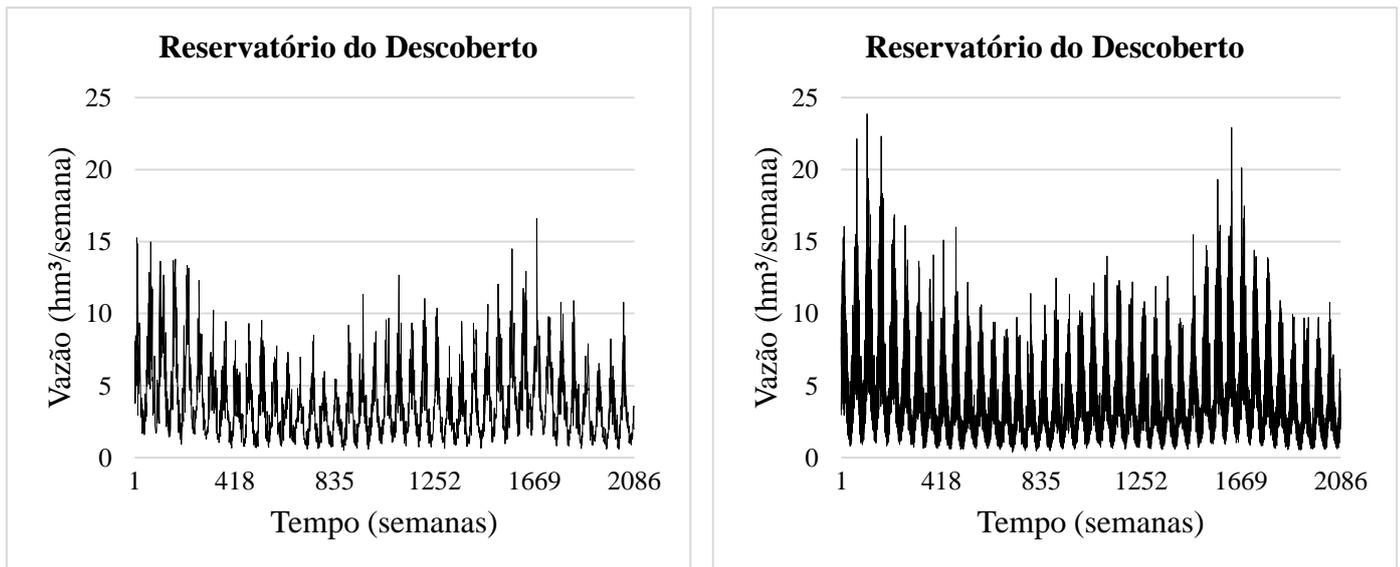


Figura 5.1 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de vazão gerada pelo modelo $Q_w = \exp(\hat{D}_w + \hat{S}_w + \varepsilon_w)$ com $\varepsilon_w \sim N(0, 0,32)$ para o reservatório do Descoberto, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.

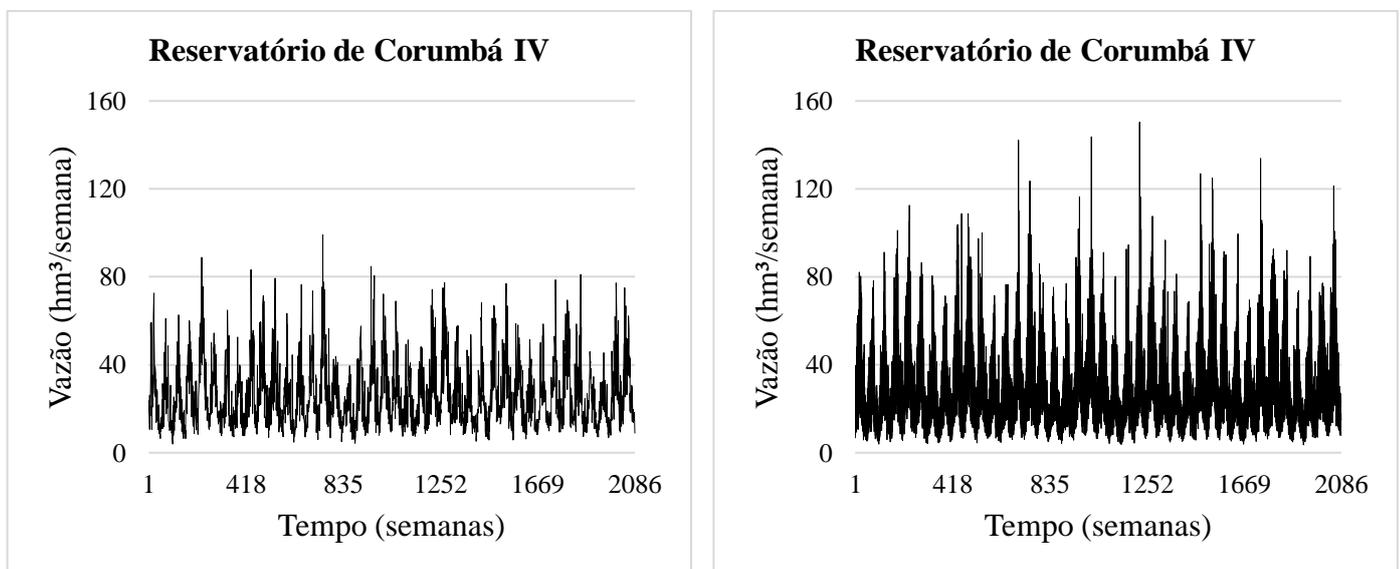


Figura 5.2 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de vazão gerada pelo modelo $Q_w = \exp(\hat{D}_w + \hat{S}_w + \varepsilon_w)$ com $\varepsilon_w \sim N(0, 0,35)$ para o reservatório de Corumbá IV, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.

5.1.2 – Santa Maria e Paranoá

No caso da represa de Santa Maria e do Lago Paranoá, as séries históricas das vazões de cada afluente foram modeladas separadamente devido à escassez de dados diários. Em seguida, efetuou-se a agregação das respectivas séries sintéticas geradas, a fim de se obter a vazão afluente total aos reservatórios.

A represa de Santa Maria recebe a contribuição de três afluentes principais (vide Tabela 4.15): Córrego Milho Cozido, Córrego Santa Maria, e Córrego Vargem Grande. A componente decenal de cada uma dessas três séries foi obtida mediante regressão linear de $\ln Q_w$ sobre D_w , tendo como referência $w = 0$ a primeira semana do ano de 1985 para a série temporal do Córrego Milho Cozido e de 1982 para as séries temporais de Santa Maria e Vargem Grande, de acordo com os dados disponíveis. Os resultados das estimativas obtidas para os coeficientes da componente decenal \hat{D}_w são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente decenal (\hat{D}_w) referentes à modelagem dos afluentes Milho Cozido, Santa Maria e Vargem Grande.

Córrego Milho Cozido	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	- 0,899	0,04350	- 20,67	< 0,0001
- 0,132	0,05893	- 2,25	0,0252	
Córrego Santa Maria	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	- 0,899	0,03430	- 26,15	< 0,0001
	- 0,113	0,04763	- 2,36	0,01890
0,187	0,04788	3,91	0,00011	
Córrego Vargem Grande	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	- 1,927	0,03122	- 61,74	< 0,0001
	- 0,113	0,04337	- 2,45	0,0148
0,187	0,04327	4,47	< 0,0001	

Em seguida, efetuou-se a regressão linear de $\ln Q_w - \hat{D}_w$ sobre S_w , de modo a obter a componente sazonal (\hat{S}_w) do modelo de decomposição correspondente a cada afluente (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente sazonal (\hat{S}_w) referentes à modelagem dos afluentes Milho Cozido, Santa Maria e Vargem Grande.

Milho Cozido	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,326	0,03371	9,66	< 0,0001
	0,817	0,03361	24,31	< 0,0001
	0,152	0,03357	4,54	< 0,0001
	0,087	0,03432	2,54	0,0116
- 0,128	0,03313	- 3,87	0,0001	
Santa Maria	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,216	0,03019	7,15	< 0,0001
	0,628	0,03016	20,81	< 0,0001
	0,099	0,03015	3,29	0,0011
	0,097	0,03062	3,17	0,0017
- 0,085	0,02982	- 2,84	0,0048	
Vargem Grande	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,072	0,03259	2,20	0,0283
	0,512	0,03239	15,81	< 0,0001

Quanto ao desvio padrão do erro aleatório, obteve-se a estimativa de $\hat{\sigma} = 0,46$ para o modelo representativo da série temporal do Córrego Milho Cozido, de $\hat{\sigma} = 0,41$ para o Córrego Santa Maria e de $\hat{\sigma} = 0,45$ para o Córrego Vargem Grande.

Por fim, foram geradas as séries sintéticas de vazão correspondentes aos anos de 1970 a 2059 para cada um dos três afluentes, por meio de seus respectivos modelos de decomposição obtidos (Tabela 5.6). Essa simulação foi realizada considerando uma malha temporal com $w = -624, -623, \dots, 0, \dots, 4054, 4055$, na qual o ponto 0 representa a primeira semana do ano de 1982. Foram geradas três séries de 4680 ruídos aleatórios (ε_w) com média 0 e desvio padrão de $\hat{\sigma} = 0,46, 0,41$ e $0,45$ para o Córrego Milho Cozido, Santa Maria e Vargem Grande, respectivamente, as quais foram aplicadas sobre os modelos de decomposição correspondentes.

Tabela 5.6 - Modelo de decomposição obtido para as séries temporais de vazão dos afluentes da represa de Santa Maria (Milho Cozido, Santa Maria e Vargem Grande).

Afluente	Modelo de Decomposição
Milho Cozido	$Q_w = \exp \left(-0,899 - 0,132 \operatorname{sen} \frac{2\pi w}{10 \times 52} + 0,326 \operatorname{cos} \frac{2\pi w}{52} \right. \\ \left. + 0,817 \operatorname{sen} \frac{2\pi w}{52} + 0,152 \operatorname{cos} \frac{4\pi w}{52} + 0,087 \operatorname{cos} \frac{6\pi w}{52} \right. \\ \left. - 0,128 \operatorname{sen} \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Santa Maria	$Q_w = \exp \left(-0,899 - 0,113 \operatorname{cos} \frac{4\pi w}{10 \times 52} + 0,187 \operatorname{cos} \frac{2\pi w}{10 \times 52} \right. \\ \left. + 0,216 \operatorname{cos} \frac{2\pi w}{52} + 0,628 \operatorname{sen} \frac{2\pi w}{52} + 0,099 \operatorname{cos} \frac{4\pi w}{52} \right. \\ \left. + 0,097 \operatorname{cos} \frac{6\pi w}{52} - 0,085 \operatorname{sen} \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Vargem Grande	$Q_w = \exp \left(-1,927 - 0,113 \operatorname{cos} \frac{4\pi w}{10 \times 52} + 0,187 \operatorname{cos} \frac{2\pi w}{10 \times 52} \right. \\ \left. + 0,072 \operatorname{cos} \frac{2\pi w}{52} + 0,512 \operatorname{sen} \frac{2\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$

Por fim, tais séries foram agregadas para fins de obtenção da vazão afluente total à represa de Santa Maria. Os resultados são apresentados na Figura 5.3.

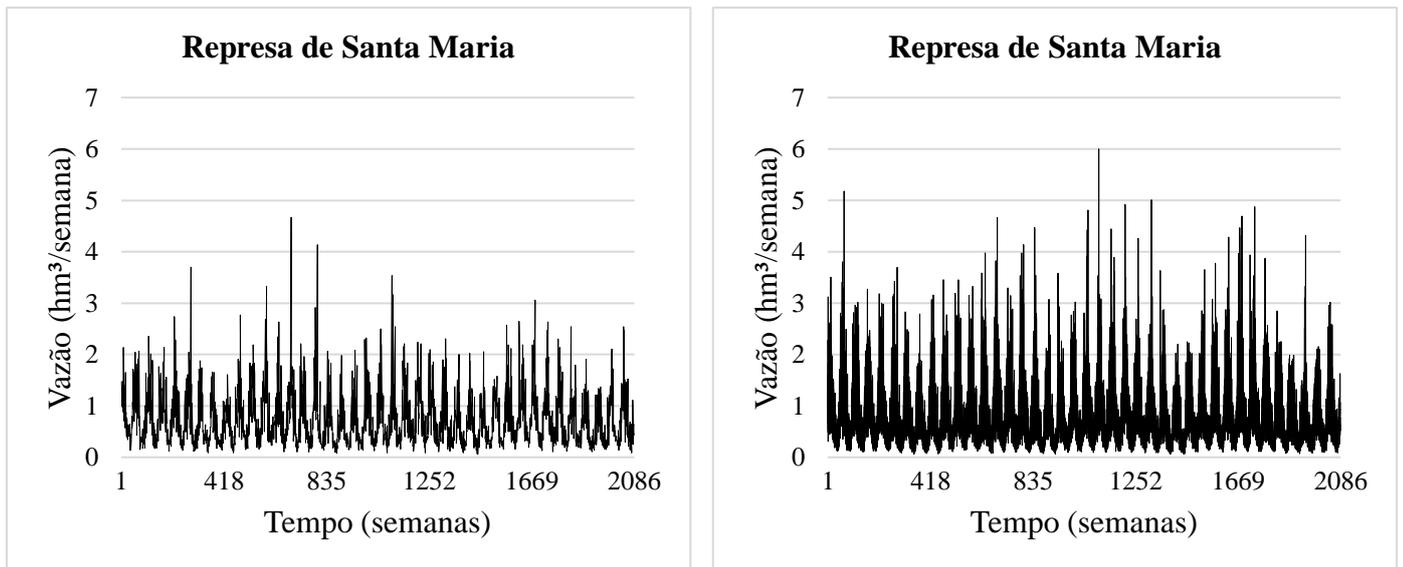


Figura 5.3 - Painel esquerdo: exemplo de série sintética de vazão gerada para a represa de Santa Maria, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.

Quanto ao Lago Paranoá, observa-se que este recebe a contribuição de cinco afluentes principais (vide Tabela 4.15): Ribeirão do Torto, Ribeirão Bananal, Ribeirão Riacho Fundo, Ribeirão do Gama e Ribeirão Cabeça de Veado.

A componente decenal de cada uma das séries temporais foi obtida mediante regressão linear de $\ln Q_w$ sobre D_w , tendo como referência $w = 0$ a primeira semana do ano de 1971 para a série temporal do Ribeirão Bananal, de 1978 para o Ribeirão Riacho Fundo e Ribeirão do Torto, de 1984 para o Ribeirão do Gama e de 1970 para o Córrego Cabeça de Veado, conforme os dados disponíveis. Os resultados das estimativas dos coeficientes correspondentes à componente decenal \hat{D}_w são apresentados na Tabela 5.7.

Em seguida, efetuou-se a regressão linear de $\ln Q_w - \hat{D}_w$ sobre S_w , de modo a obter a componente sazonal (\hat{S}_w) do modelo de decomposição correspondente a cada afluente, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.7 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente decenal (\hat{D}_w) referentes à modelagem dos afluentes Bananal, Riacho Fundo, Torto, Gama e Cabeça de Veado.

	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
Bananal	0,664	0,01011	65,73	< 0,0001
	0,139	0,01424	9,74	< 0,0001
	- 0,107	0,01434	-7,50	< 0,0001
	0,031	0,01435	2,14	0,0329
Riacho Fundo	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	1,211	0,01650	73,44	< 0,0001
	- 0,138	0,02378	-5,81	< 0,0001
	0,073	0,02286	3,18	0,0015
Torto	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,268	0,02491	10,77	< 0,0001
	- 0,558	0,03542	- 15,77	< 0,0001
	0,176	0,03503	5,03	< 0,0001
	0,211	0,03508	6,03	< 0,0001
Gama	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,457	0,01702	26,87	< 0,0001
	0,066	0,02439	2,69	0,0072
Cabeça de Veado	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	- 1,266	0,01561	- 81,10	< 0,0001
	0,107	0,02212	4,85	< 0,0001
	- 0,069	0,02195	- 3,13	0,0018

Quanto ao desvio padrão do erro aleatório, obteve-se a estimativa de $\hat{\sigma} = 0,43$ para o modelo representativo da série temporal do Ribeirão Bananal, de $\hat{\sigma} = 0,60$ para o Ribeirão Riacho Fundo, de $\hat{\sigma} = 0,86$ para o Ribeirão do Torto, de $\hat{\sigma} = 0,48$ para o Ribeirão do Gama e de $\hat{\sigma} = 0,64$ para o Córrego Cabeça de Veado.

Por fim, foram geradas as séries sintéticas de vazão correspondentes aos anos de 1970 a 2059 para cada um dos cinco afluentes, as quais foram posteriormente agregadas. Inicialmente, malhas temporais foram produzidas para as séries de cada afluente de acordo com as especificações abaixo:

- Ribeirão Bananal: malha temporal com $w = -52, -51, \dots, 0, \dots, 4626, 4627$, na qual o ponto 0 representa a primeira semana do ano de 1970;
- Ribeirão Riacho Fundo e Ribeirão do Torto: malha temporal com $w = -416, \dots, 0, \dots, 4.263$, na qual o ponto 0 representa a primeira semana do ano de 1978;
- Ribeirão do Gama: malha temporal com $w = -728, \dots, 0, \dots, 3951$, na qual o ponto 0 representa a primeira semana do ano de 1984;

- Córrego Cabeça de Veado: malha temporal com $w = 0, \dots, 4680$, na qual o ponto 0 representa a primeira semana do ano de 1970.

Tabela 5.8 - Resumo das estimativas dos coeficientes da componente sazonal (\hat{S}_w) referentes à modelagem dos afluentes Bananal, Riacho Fundo, Torto, Gama e Cabeça de Veado.

	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
Bananal	0,314	0,01257	25,00	< 0,0001
	0,061	0,01254	4,90	< 0,0001
	- 0,031	0,01258	- 2,44	0,0148
	- 0,038	0,01255	- 3,00	0,0027
Riacho Fundo	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,286	0,02194	13,02	< 0,0001
	- 0,055	0,02198	-2,52	0,0119
	0,050	0,02195	2,29	0,0220
Torto	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,553	0,02705	20,47	< 0,0001
	0,850	0,02687	31,65	< 0,0001
	0,065	0,02696	2,42	0,0155
	- 0,083	0,02696	- 3,07	0,0021
	- 0,065	0,02696	- 2,42	0,0155
Gama	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,148	0,01622	9,15	< 0,0001
	0,722	0,01617	44,67	< 0,0001
	0,047	0,01619	2,88	0,0040
	0,091	0,01619	5,62	< 0,0001
Cabeça de Veado	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	0,126	0,01833	6,85	< 0,0001
	- 0,569	0,01838	- 30,94	< 0,0001
	0,050	0,01837	2,75	0,0060
	- 0,098	0,01836	- 5,36	< 0,0001

Em seguida, para cada afluente, foram gerados 4680 ruídos aleatórios com média nula e desvio padrão equivalente a $\hat{\sigma} = 0,43$ (Bananal), $\hat{\sigma} = 0,60$ (Riacho Fundo), $\hat{\sigma} = 0,86$ (Torto), $\hat{\sigma} = 0,48$ (Gama) e $\hat{\sigma} = 0,64$ (Cabeça de Veado), os quais foram aplicados sobre os respectivos modelos de decomposição obtidos (Tabela 5.9).

Por fim, tais séries foram agregadas para obtenção da vazão afluente total ao Lago Paranoá. Os resultados são apresentados na Figura 5.4 e correspondem ao período de 2020 a 2059.

Tabela 5.9 - Modelo de decomposição obtido para as séries temporais de vazão dos afluentes do Lago Paranoá (Bananal, Riacho Fundo, Torto, Gama e Cabeça de Veado).

Afluente	Modelo de Decomposição
Bananal	$Q_w = \exp \left(0,664 + 0,139 \cos \frac{2\pi w}{10 \times 52} - 0,107 \sin \frac{2\pi w}{10 \times 52} \right. \\ \left. + 0,031 \sin \frac{4\pi w}{10 \times 52} + 0,314 \cos \frac{2\pi w}{52} + 0,061 \sin \frac{2\pi w}{52} \right. \\ \left. - 0,031 \sin \frac{4\pi w}{52} - 0,038 \cos \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Riacho Fundo	$Q_w = \exp \left(1,211 - 0,138 \cos \frac{2\pi w}{10 \times 52} + 0,073 \sin \frac{2\pi w}{10 \times 52} \right. \\ \left. + 0,286 \cos \frac{2\pi w}{52} - 0,055 \sin \frac{6\pi w}{52} + 0,050 \cos \frac{8\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Torto	$Q_w = \exp \left(0,268 - 0,558 \cos \frac{2\pi w}{10 \times 52} + 0,176 \sin \frac{2\pi w}{10 \times 52} \right. \\ \left. + 0,211 \sin \frac{4\pi w}{10 \times 52} + 0,553 \cos \frac{2\pi w}{52} + 0,850 \sin \frac{2\pi w}{52} \right. \\ \left. + 0,065 \cos \frac{4\pi w}{52} - 0,083 \sin \frac{4\pi w}{52} - 0,065 \sin \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Gama	$Q_w = \exp \left(0,457 + 0,066 \cos \frac{2\pi w}{10 \times 52} + 0,148 \cos \frac{2\pi w}{52} \right. \\ \left. + 0,722 \sin \frac{2\pi w}{52} + 0,047 \cos \frac{4\pi w}{52} + 0,091 \cos \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Cabeça de Veado	$Q_w = \exp \left(-1,266 + 0,107 \cos \frac{2\pi w}{10 \times 52} - 0,069 \sin \frac{2\pi w}{10 \times 52} \right. \\ \left. + 0,126 \cos \frac{2\pi w}{52} - 0,569 \sin \frac{2\pi w}{52} + 0,050 \sin \frac{4\pi w}{52} \right. \\ \left. - 0,098 \sin \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$

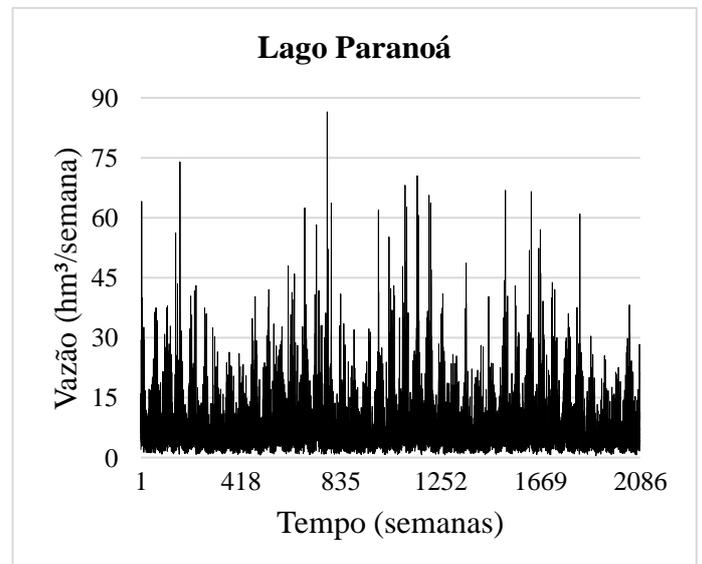
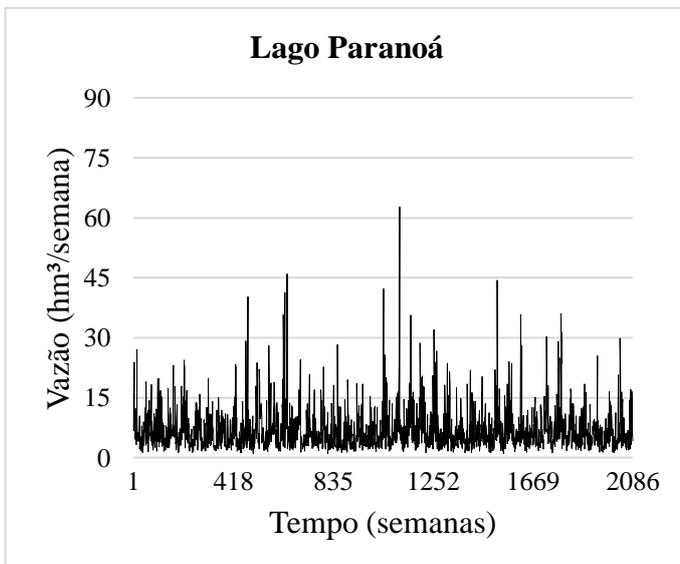


Figura 5.4 - Painel esquerdo: exemplo de série sintética de vazão gerada para o reservatório do Paranoá, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.

5.2 – SÉRIES SINTÉTICAS DE TAXAS DE EVAPORAÇÃO

Quanto à modelagem das séries temporais de evaporação referentes aos reservatórios do Descoberto, de Santa Maria e do Paranoá, inicialmente foram estimados os coeficientes das respectivas componentes sazonais (S_w), cujos resultados são apresentados na Tabela 5.10. Ressalta-se que os resultados obtidos para o Paranoá foram estendidos ao Corumbá IV.

Tabela 5.10 - Estimativa dos coeficientes da componente sazonal (\hat{S}_w) correspondente às séries temporais de evaporação dos reservatórios Descoberto, Santa Maria e Paranoá.

	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
Descoberto	1,101	0,00869	126,56	< 2e-16
	0,033	0,01230	2,68	0,00764
	- 0,141	0,01230	- 11,42	< 2e-16
	- 0,107	0,01230	- 8,68	< 2e-16
	0,034	0,01230	2,77	0,00589
Santa Maria	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	1,266	0,00786	160,97	< 2e-16
	0,074	0,01112	6,65	2,24e-10
	- 0,120	0,01112	- 10,88	< 2e-16
	- 0,123	0,01112	- 11,03	< 2e-16
	0,049	0,01112	4,41	1,6e-05
	0,034	0,01112	3,04	0,00268
Paranoá (e Corumbá IV)	Estimativa	Erro padrão	Razão t	p-valor
	1,060	0,00819	129,24	< 2e-16
	0,040	0,01159	3,48	0,000556
	- 0,107	0,01159	- 9,26	< 2e-16
	- 0,087	0,01159	- 7,54	3,08e-13
	0,023	0,01159	2,01	0,045168
	0,028	0,01159	2,41	0,016445
- 0,025	0,01159	-2,12	0,034999	

Quanto ao desvio padrão do erro aleatório, obteve-se a estimativa de $\hat{\sigma} = 0,161$ para o modelo representativo da série temporal do reservatório do Descoberto, $\hat{\sigma} = 0,117$ para a represa de Santa Maria e $\hat{\sigma} = 0,167$ para o Lago Paranoá.

Os dados de evaporação são todos mensais e cobrem períodos distintos (vide Tabela 4.16). Para a definição da malha temporal, o ciclo anual de 12 meses foi convertido em ciclo anual de 52 semanas. Dessa forma, cada observação mensal representa um incremento de 12/52 semana, aproximadamente. Por isso, para a geração das séries temporais sintéticas de evaporação nesse estudo, considerou-se como malha temporal os instantes de tempo t , tais que $t = -192 + k \times \frac{12}{52}$, em que $k = 1, \dots, 4680$.

Desse modo, o modelo de decomposição obtido para cada uma das séries temporais de evaporação é apresentado na Tabela 5.11, por meio do qual foram geradas as 1.000 séries sintéticas de evaporação.

Tabela 5.11 - Modelo de decomposição resultante para as séries temporais de evaporação referentes ao reservatório do Descoberto, de Santa Maria, do Paranoá e de Corumbá IV.

Série temporal de Evaporação	Modelo de Decomposição
Descoberto	$E_w = \exp \left(1,101 + 0,033 \cos \frac{2\pi w}{52} - 0,141 \sin \frac{2\pi w}{52} - 0,107 \cos \frac{4\pi w}{52} + 0,034 \sin \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Santa Maria	$E_w = \exp \left(1,266 + 0,074 \cos \frac{2\pi w}{52} - 0,120 \sin \frac{2\pi w}{52} - 0,123 \cos \frac{4\pi w}{52} + 0,049 \sin \frac{4\pi w}{52} + 0,034 \sin \frac{6\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$
Paranoá (e Corumbá IV)	$E_w = \exp \left(1,060 + 0,040 \cos \frac{2\pi w}{52} - 0,107 \sin \frac{2\pi w}{52} - 0,087 \cos \frac{4\pi w}{52} + 0,023 \sin \frac{4\pi w}{52} + 0,028 \sin \frac{6\pi w}{52} - 0,025 \cos \frac{8\pi w}{52} + \varepsilon_w \right)$

As séries sintéticas de evaporação resultantes da aplicação dos modelos de decomposição obtidos para cada reservatório (Tabela 5.11) são apresentadas nas Figura 5.5 a 5.7.

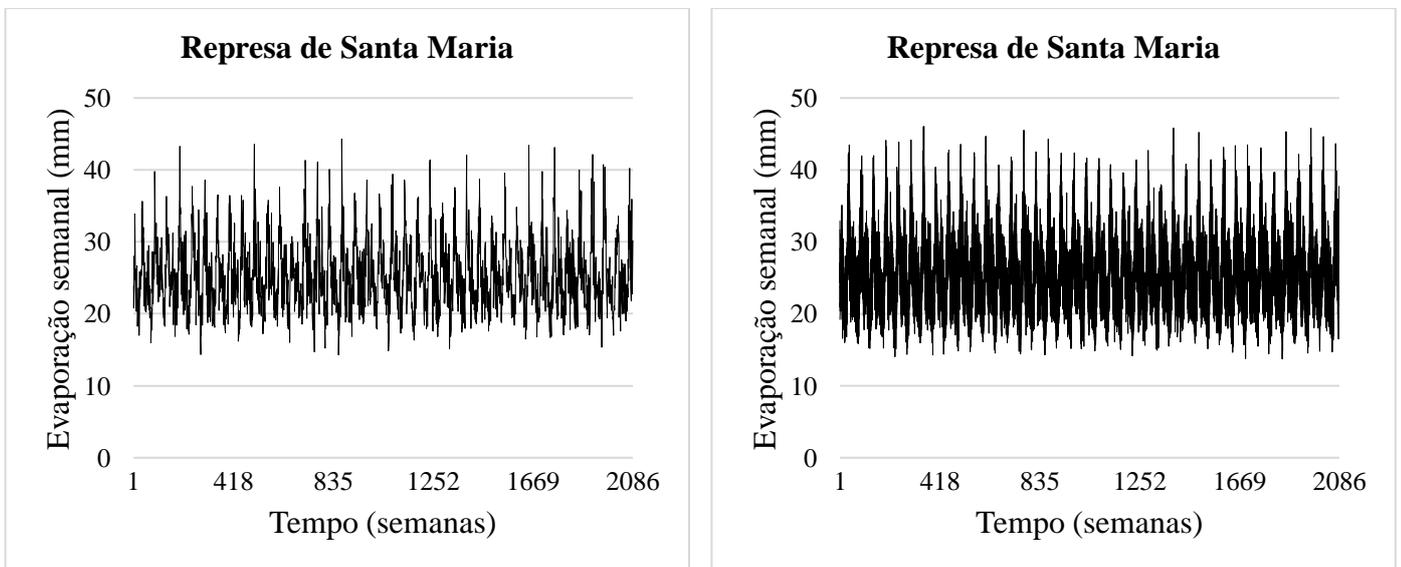


Figura 5.5 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de evaporação gerada para a represa de Santa Maria, de 1970 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.

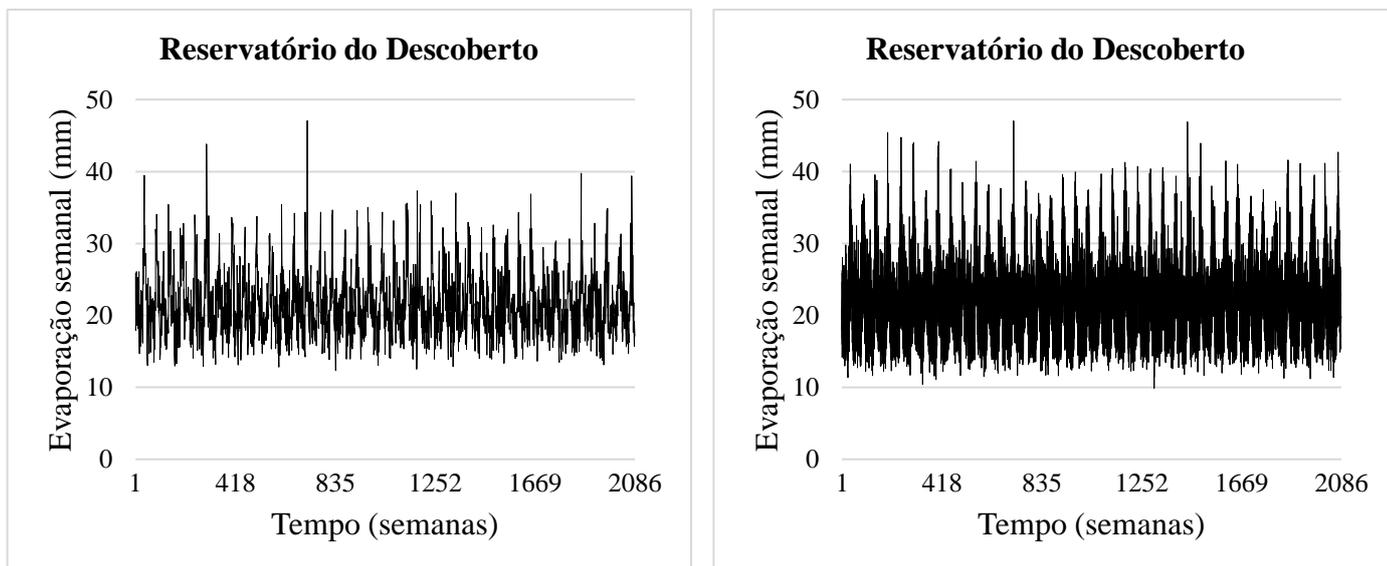


Figura 5.6 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de evaporação gerada para o reservatório Descoberto, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.

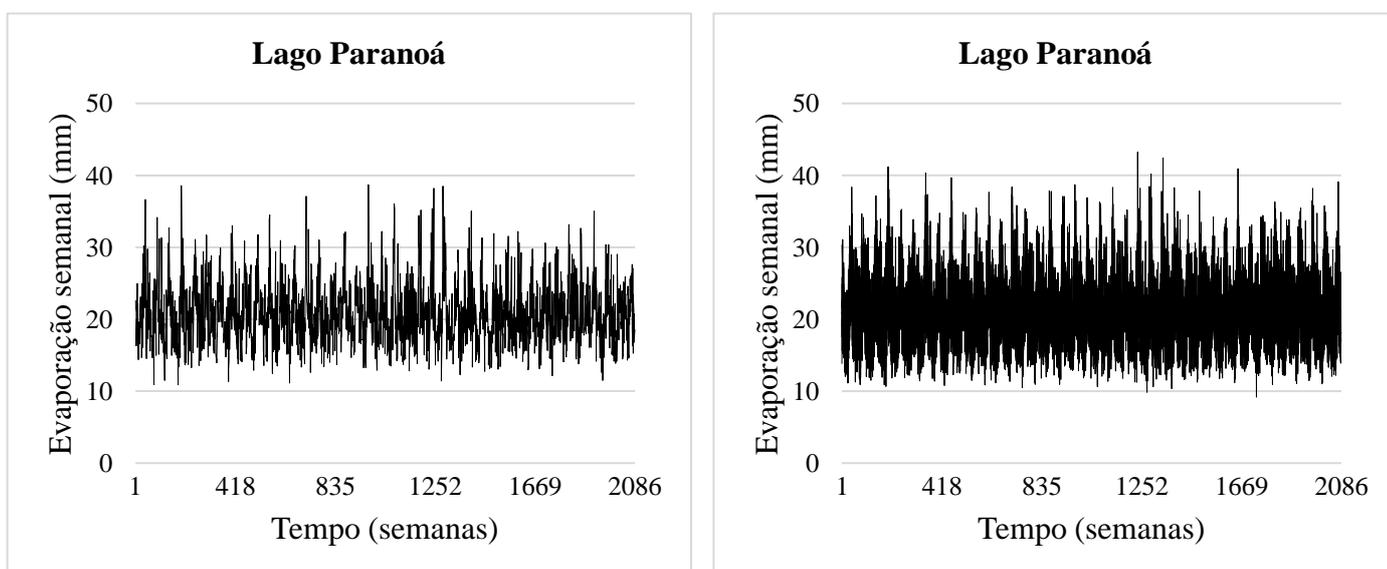


Figura 5.7 - Painel esquerdo: exemplo de uma série sintética de evaporação gerada para o Lago Paranoá, de 2020 a 2059. Painel direito: sobreposição de dez séries sintéticas geradas pelo mesmo modelo.

5.3 – SÉRIES SINTÉTICAS DE DEMANDA

A demanda de referência, obtida por meio dos procedimentos detalhados no item 4.2.1.3, é apresentada na Tabela 5.12. Os valores da tabela correspondem às demandas semanais acumuladas ao longo de seu respectivo ano para cada companhia de saneamento. Observa-se que a demanda da CAESB_DESC é aproximadamente 60% superior à demanda da CAESB_TSM. Desse modo, o Sistema Descoberto é pressionado por uma demanda mais elevada, o que contribui com o aumento de sua susceptibilidade a estresses hídricos.

Tabela 5.12 - Projeção da demanda anual de água por companhia (demanda de referência).

Ano	Demanda anual de água (hm ³)		Ano	Demanda anual de água (hm ³)	
	CAESB_TSM	CAESB_DESC		CAESB_TSM	CAESB_DESC
2020	54,64	91,55	2040	66,14	110,83
2021	55,37	92,79	2041	66,51	111,45
2022	56,10	94,00	2042	66,86	112,04
2023	56,81	95,19	2043	67,19	112,59
2024	57,50	96,35	2044	67,50	113,11
2025	58,18	97,49	2045	67,79	113,59
2026	58,84	98,60	2046	68,05	114,04
2027	59,48	99,68	2047	68,30	114,45
2028	60,11	100,72	2048	68,52	114,82
2029	60,71	101,74	2049	68,72	115,16
2030	61,30	102,72	2050	68,90	115,47
2031	61,87	103,67	2051	69,06	115,74
2032	62,42	104,59	2052	69,20	115,97
2033	62,95	105,49	2053	69,32	116,17
2034	63,46	106,35	2054	69,42	116,33
2035	63,96	107,18	2055	69,50	116,46
2036	64,44	107,98	2056	69,55	116,55
2037	64,89	108,74	2057	69,59	116,61
2038	65,33	109,47	2058	69,60	116,63
2039	65,74	110,17	2059	69,59	116,62

Por fim, apresentam-se na Figura 5.8 alguns exemplos de séries de demanda obtidas para cada uma das companhias de saneamento.

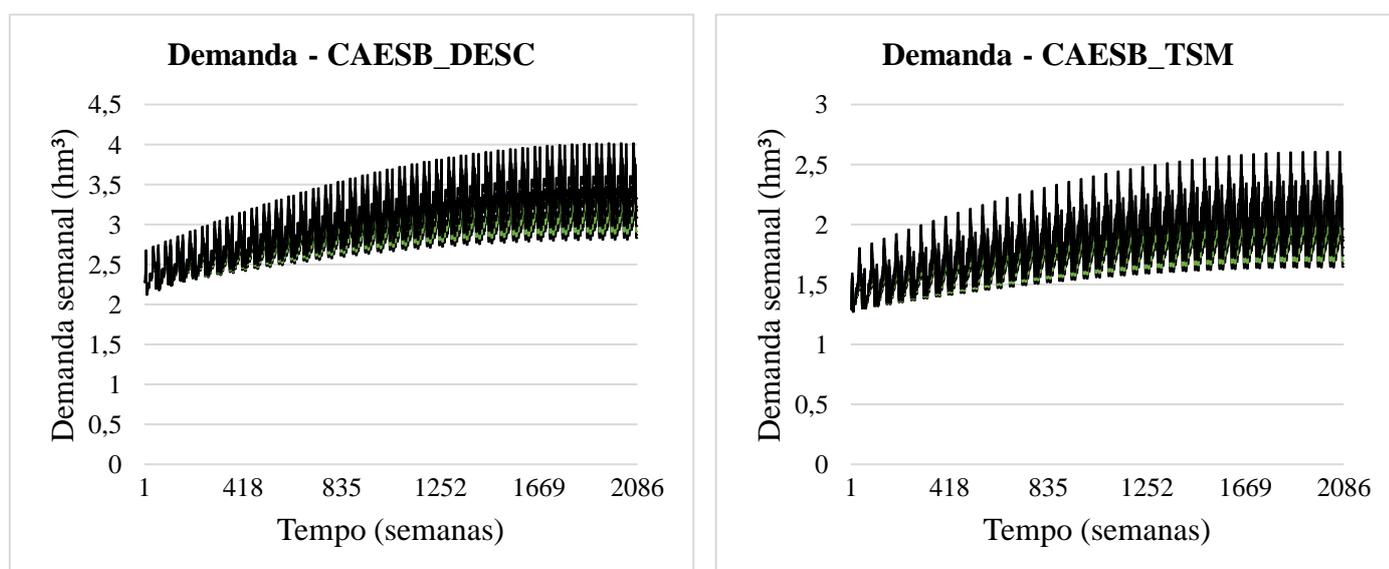


Figura 5.8 - Painel esquerdo: sobreposição de 10 séries sintéticas de demanda referentes à companhia CAESB_DESC. Painel direito: sobreposição de 10 séries sintéticas de demanda referentes à companhia CAESB_TSM.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas seções 6.1 a 6.4, são apresentados os resultados e discussões dessa pesquisa referentes às análises efetuadas sobre as políticas de gestão e planejamento do SAAU do DF, as quais foram otimizadas com o auxílio do sistema de simulação estocástica WaterPaths acoplado ao algoritmo Borg MS.

Tais análises exploram as relações de troca entre as funções objetivo das políticas ótimas de Pareto (seção 6.1), as estratégias complementares de curto e de longo prazo empregadas pelas companhias de saneamento (seção 6.2 e 6.3), o sequenciamento das infraestruturas construídas ao longo do horizonte de planejamento (seção 6.3) e a evolução do comportamento dos reservatórios utilizados pelas companhias (seção 6.4).

6.1 – ANÁLISE DAS RELAÇÕES DE TROCA ENTRE AS FUNÇÕES OBJETIVO DAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO

Conforme mencionado no item 4.2.2.1, duas diferentes formulações dos portfólios de abastecimento foram exploradas com relação ao desempenho de cinco funções objetivo. Na Figura 6.1, são apresentadas as relações de troca entre os cinco objetivos otimizados, referentes às soluções ótimas de Pareto da formulação I (modelo com fundo de contingência – em cor azul) e II (modelo sem fundo de contingência – em cor marrom), as quais totalizam 383 e 281 políticas, respectivamente. Cada linha azul ou marrom representa a performance de uma política de abastecimento urbano (uma solução), cujo desempenho das funções objetivo é medido verticalmente ao longo de seus respectivos eixos, a saber:

- 1º eixo: confiabilidade do fornecimento (CONF);
- 2º eixo: frequência de restrição (FR);
- 3º eixo: valor presente líquido do custo de infraestrutura (IVPL);
- 4º eixo: custo anual médio (CAM);
- 5º eixo: custo do pior primeiro percentil (CPPP).

Os eixos paralelos são orientados de tal modo que a solução ideal seria aquela constituída por uma linha horizontal localizada na parte inferior do gráfico, região de valor máximo do objetivo de confiabilidade (CONF) e de valor mínimo das demais funções objetivo (FR, IVPL, CAM, CPPP). O cruzamento de linhas diagonais entre os eixos paralelos, por sua vez,

indica que os objetivos adjacentes possuem relações conflitantes, ao passo que as diferentes tonalidades de azul e marrom representam o grau de confiabilidade associado à respectiva política. Desse modo, quanto mais escuro o tom, maior é a confiabilidade do fornecimento de água alcançada pela política retratada (maior é o valor do objetivo de confiabilidade). Por fim, tem-se que os valores apresentados na Figura 6.1 correspondem ao desempenho da pior companhia (CAESB_DESC ou CAESB_TSM), conforme descrito na seção 3.4.6.

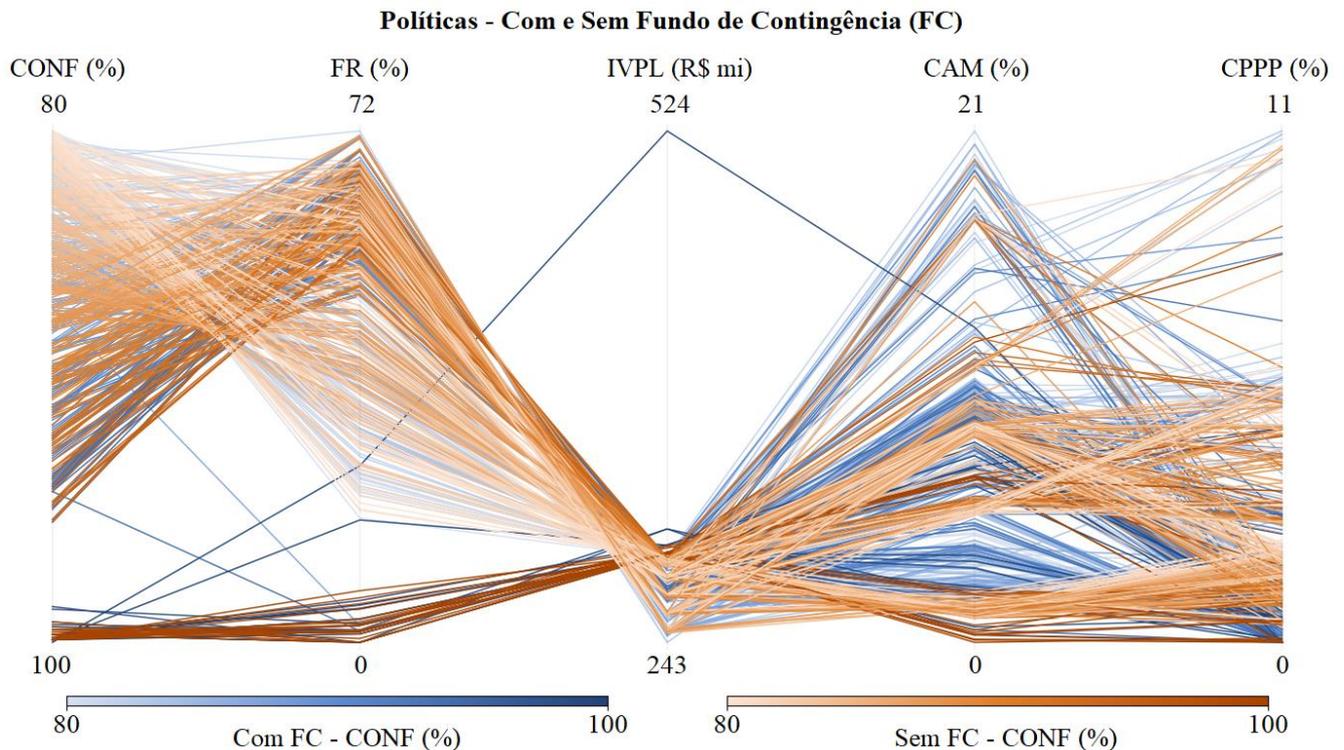


Figura 6.1 - Conjunto de todas as políticas não dominadas (Frente de Pareto) referentes à otimização com fundo de contingência (azul) e sem fundo de contingência (marrom).

Nota-se que alta confiabilidade (acima de 85%) geralmente requer restrições de consumo com frequência superior a 50%, a exceção de um pequeno conjunto de políticas (localizado na região inferior do gráfico) com confiabilidade superior a 98% sob frequências de restrição menores do que 10%. Percebe-se, todavia, que esse conjunto de políticas realizou maiores investimentos em ampliação da infraestrutura de oferta (IVPL), próximos aos 300 milhões de reais, o que demonstra a necessidade dos empreendimentos de expansão da infraestrutura hídrica para o alcance de maiores confiabilidades e para a redução da frequência de utilização de instrumentos de mitigação de secas (restrições).

A política de maior confiabilidade alcançada, por sua vez, demanda não somente elevados investimentos em infraestrutura (superiores a R\$ 500 milhões), como também maiores frequências de restrição (em torno de 25%). Tal política foi a única a apresentar 100% de

confiabilidade, o que significa que, em todos os 1.000 cenários simulados, as companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM registraram volume total armazenado superior a 20% de sua capacidade máxima durante todo o horizonte de planejamento (2020 a 2059). Dado que outras políticas atingiram valores de confiabilidade muito próximos a 100% sob investimentos e frequências de restrição muito menores, tem-se que esse pequeno ganho de confiabilidade parece não compensar todos os custos adicionais necessários para atingi-lo.

Conforme demonstrado no terceiro eixo (IVPL), observa-se que todas as políticas otimizadas recorrem à ampliação da infraestrutura de oferta ao longo dos 40 anos simulados, independentemente de sua confiabilidade ou frequência de restrição, o que indica um risco imediato de incapacidade de atendimento da demanda de água com a oferta atual, corroborando a necessidade de expansão da oferta de água. Tal fato é coerente com o recente Plano Distrital de Saneamento Básico (GDF, 2017b), cujas análises verificaram a necessidade de ampliação do volume de água ofertado no DF já no ano de 2022. Os valores investidos pela companhia de pior resultado concentram-se entre R\$ 240 e 300 milhões, mas aqueles que se aproximam de R\$ 300 milhões refletem, de modo geral, menores valores do objetivo CAM. Nesse caso, tem-se que a expansão da oferta de água reduz a necessidade de utilização dos instrumentos de mitigação das secas e de contribuição ao fundo de contingência, o que favorece a diminuição dos custos anuais médios das companhias. Isso ocorre porque tais instrumentos oneram bastante seus respectivos orçamentos no curto prazo, ao passo que os empréstimos obtidos para subsidiar a construção de infraestruturas são amortizados a longo prazo.

Observa-se também que, em geral, as políticas com fundo de contingência (linhas azuis – formulação I) apresentam custos anuais médios (CAM) superiores aos das políticas que não fazem uso desse instrumento (linhas marrons – formulação II). Como essa função objetivo abrange os custos relacionados às contribuições para o fundo de contingência (vide item 3.4.6.4), tem-se que a adoção desse instrumento nos portfólios de abastecimento pode resultar no aumento dos custos anuais médios das companhias, visto que estas devem destinar parte de suas receitas à manutenção dos fundos. Entretanto, a reserva disponível nos fundos de contingência tende a reduzir a variabilidade dos custos anuais das companhias (CPPP), ocasionada pelas perdas de receita decorrentes das restrições de consumo e pelos custos adicionais relacionados às transferências de água. Apesar de sutil, nota-se que as políticas da formulação I de fato concentram menores valores de CPPP, muitas das quais

atingem zero, o que decorre da cobertura fornecida pelo fundo de contingência mantido pelas companhias. A redução dessa variabilidade, por sua vez, é bastante desejável, tendo em vista que oscilações de receitas e despesas anuais podem desequilibrar os fluxos de caixa da companhia e baixar a sua nota de crédito, a qual indica a capacidade de pagamento da empresa ao seu credor dentro do prazo estabelecido. Desse modo, quando tal nota diminui, a aquisição de novos empréstimos torna-se mais difícil e geralmente mais dispendiosa (Moody's, 2017; Zeff *et al.*, 2014; Zeff e Characklis, 2013).

6.1.1 – Definição do espaço viável de soluções

Apesar de as políticas apresentadas na Figura 6.1 corresponderem às melhores soluções identificadas no processo de otimização, faz-se necessário ponderar determinadas limitações aos valores assumidos por algumas funções objetivo, a fim de constituir um espaço viável de soluções, ou seja, soluções que possam ser implementadas na prática. Por exemplo, seria completamente desarrazado a adoção de portfólios de abastecimento que implementassem restrições de consumo a cada dois anos. Na perspectiva de um planejamento descentralizado, advoga-se que a seleção desse subespaço viável de implementação de políticas seja realizada a partir de um consenso entre gestores e reguladores. No presente trabalho, esses limites foram definidos com base em estudos da literatura (Herman *et al.*, 2014; Trindade *et al.*, 2019, 2020; Zeff *et al.*, 2014, 2016) e em concordância com a realidade operacional do sistema de abastecimento urbano do DF.

Desse modo, estabeleceu-se que as soluções aceitáveis devem apresentar confiabilidade (CONF) superior a 99%, frequência de restrição de uso da água (FR) e custo anual médio (CAM) inferiores a 5% e variabilidade dos custos anuais (CPPP) inferior a 0,5%. Tais restrições representam uma sinalização de valores limites para os referidos objetivos e visam favorecer o alcance de um serviço de abastecimento ininterrupto e financeiramente sustentável. No caso da função de valor presente líquido do custo de infraestrutura (IVPL), assumiu-se que a companhia terá nota de crédito alta o suficiente para contrair empréstimos sempre que julgar necessária a construção de nova infraestrutura, visto que se trata de uma empresa pública cujo poder público é o acionista majoritário. Além disso, observou-se que os valores de IVPL apresentados pelas políticas são bastante próximos (entre R\$ 243 e 300 milhões), de modo que a imposição de valores limites à referida função objetivo demonstrou-se pouco relevante.

Dado que cada política é avaliada sob 1.000 cenários distintos, a limitação da confiabilidade para valores superiores a 99% garante que o somatório do volume disponível nos reservatórios de cada companhia tenha se mantido acima de 20% de sua capacidade máxima ao longo de todo o horizonte de planejamento em pelo menos 990 dos 1.000 cenários simulados (vide Equação 3.5). Ao limitar a frequência de restrição para valores inferiores a 5%, garante-se que, em média, restrições de uso da água terão sido implementadas em apenas 2 dos 40 anos simulados em todos os 1.000 cenários avaliados. Cabe destacar que o valor de 5% atribuído à frequência de restrição nessa pesquisa é mais conservador do que o critério de desempenho adotado em outras pesquisas (Herman *et al.*, 2014; Trindade *et al.*, 2019, 2020; Zeff *et al.*, 2014, 2016), cujo valor oscila entre 10 e 20%. Optou-se por adotar postura mais conservadora em razão do modo como as restrições são implementadas no Brasil, em especial no DF, as quais muitas vezes cessam por completo o abastecimento durante determinado período. Nos estudos de caso abordados nas referidas pesquisas, tais restrições são muito menos severas e abrangem apenas usos não essenciais, como lavagem de calçadas, jardinagem, etc. A limitação de 5% aos custos anuais médios, por sua vez, visa restringir a parcela das receitas anuais das companhias destinada a pagamentos de empréstimos e custeio dos instrumentos de mitigação das secas e do fundo de contingência, ao passo que a restrição dos valores de CPPP a 0,5% visa assegurar robustez financeira às companhias.

Ao aplicar essas restrições às funções objetivo de confiabilidade, frequência de restrição, custo anual médio e custo do pior primeiro percentil, observa-se que o conjunto de soluções não dominadas reduz significativamente, conforme evidenciado na Figura 6.2. No caso da formulação I do portfólio de abastecimento, 6 políticas atenderam aos critérios de desempenho, ao passo que na formulação II, 5 políticas satisfizeram as restrições impostas. Esse subconjunto de soluções apresenta algumas propriedades gerais diferentes do conjunto completo.

Observa-se que, de modo geral, as políticas remanescentes das duas formulações apresentam relações de troca bastante similares, das quais destacam-se os investimentos semelhantes em ampliação da infraestrutura de oferta, cujos valores concentram-se próximos de R\$ 300 milhões. Esse resultado aponta para duas importantes conclusões: a) há necessidade de se expandir a infraestrutura de oferta ao longo dos 40 anos simulados; e b) os projetos implementados por essas políticas são basicamente os mesmos, como será mostrado adiante, na seção 6.3.

Na região inferior do gráfico, entretanto, evidencia-se que a otimização sem fundo de contingência (formulação II) apresentou políticas com perdas financeiras muito próximas de zero (CPPP) sob custos anuais médios (CAM) mais baixos do que aqueles das políticas da formulação I, indicando que a manutenção de um fundo de contingência nos cenários simulados não resultou em benefícios financeiros significativos.

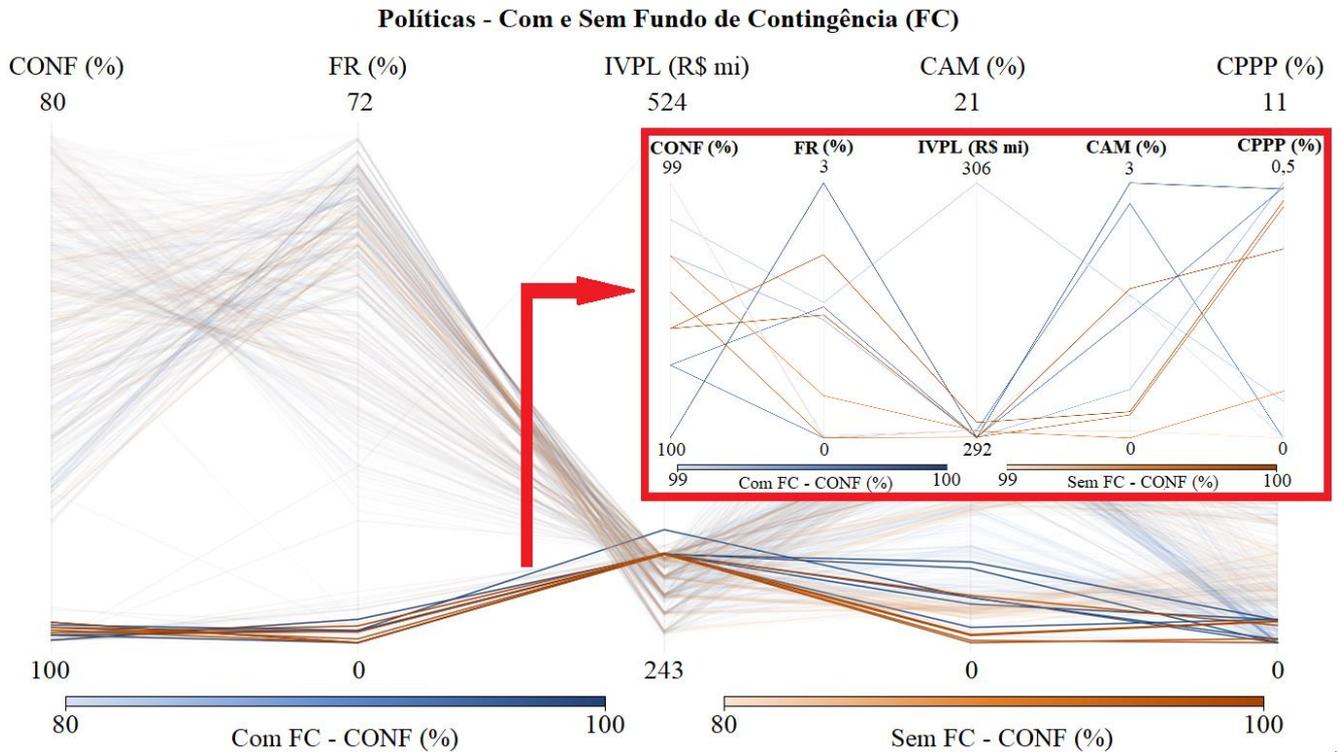


Figura 6.2 - Políticas que atendem aos critérios de desempenho estabelecidos ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$) correspondentes à otimização com fundo de contingência (linhas azuis) e sem fundo de contingência (linhas marrons).

Tal fato, todavia, deve ser ponderado com cautela, tendo em vista que as séries hidrológicas (vazão e evaporação) utilizadas nessa pesquisa possuem variabilidade limitada (vide capítulo 5). Tais séries foram geradas a partir de procedimentos determinísticos e, portanto, seguem tendências similares. Nesse sentido, os cenários hidrológicos aos quais as políticas foram submetidas carecem de condições mais diversas, o que faz com que as medidas de curto prazo (restrições e transferências) sejam menos utilizadas e, conseqüentemente, as variabilidades anuais de receitas e despesas sejam pouco significativas. Isso, por sua vez, potencializou a identificação de soluções com elevada performance no objetivo CPPP pela otimização sem fundo de contingência. Desse modo, embora as séries temporais utilizadas no estudo de caso do DF não tenham apresentado grandes desafios para as políticas de abastecimento urbano simuladas, tem-se que os fundos de contingência podem representar uma importante estratégia de prevenção contra elevadas oscilações financeiras ocasionadas

por condições climáticas mais extremas, como apresentado em Trindade *et al.* (2019, 2020) e Zeff *et al.* (2014, 2016). Além disso, a existência de um fundo próprio reduz o risco de a companhia não conseguir pagar as dívidas contraídas para custeio dos projetos de infraestrutura. Por esses motivos, sugere-se que trabalhos futuros gerem, a partir de procedimentos estocásticos, novas séries temporais sintéticas de vazão e de evaporação e reavaliem o impacto do fundo de contingência sobre as perdas financeiras das companhias. Do mesmo modo, recomenda-se que a contabilização dos custos anuais médios (CAM) das companhias na plataforma WaterPaths seja aprimorada, de modo a incluir gastos fixos e variáveis relacionados à mão de obra e à prestação do serviço de saneamento (consumo de energia elétrica, manutenção de máquinas e equipamentos, etc).

6.1.2 – Performance individual de cada companhia

A partir das políticas que atendem aos critérios de desempenho, avaliou-se a performance de cada companhia separadamente. O resultado é apresentado nas Figuras 6.3 (formulação I) e 6.4 (formulação II). As linhas verdes correspondem ao desempenho da companhia CAESB_DESC (Figura 6.3a e 6.4a), ao passo que as linhas rosas correspondem ao desempenho da companhia CAESB_TSM (Figura 6.3b e 6.4b).

Em ambas as formulações, verifica-se que a CAESB_DESC apresenta pior desempenho em praticamente todas as funções objetivo. Enquanto tal companhia alcança confiabilidade máxima de 99,9% e 99,6% na formulação I e II, respectivamente (Figuras 6.3a e 6.4a), a CAESB_TSM alcança confiabilidade de 100% em todas as políticas (Figuras 6.3b e 6.4b). Constata-se, portanto, que o somatório dos volumes disponíveis nos reservatórios utilizados pela companhia CAESB_TSM (Santa Maria e Paranoá) manteve-se, em todos os 1.000 cenários simulados, acima de 20% da capacidade máxima total durante os 40 anos de simulação. A melhoria da confiabilidade da CAESB_DESC, em contrapartida, depende de frequências de restrições maiores, conforme se observa nos dois primeiros eixos paralelos das Figuras 6.3a e 6.4a. Este não é um resultado desejável, pois tal companhia é responsável pelo abastecimento de populações menos favorecidas em termos de renda e desprovidas de mecanismos de “backup” relacionados ao abastecimento de água prestado pela companhia (como caixas d’água), o que reduz sua capacidade adaptativa. Desse modo, ressalta-se a importância de se investir em projetos de infraestrutura que forneçam novo aporte de água e reforcem o Sistema Descoberto, a fim de evitar que tais populações sejam penalizadas com restrições mais frequentes e duradouras.

Outra importante diferença notada entre as companhias diz respeito à variabilidade anual de suas receitas e despesas, conforme evidenciado no último eixo das Figuras 6.3 e 6.4. Enquanto os valores de CPPP da CAESB_TSM concentram-se muito próximos de 0%, os da companhia CAESB_DESC encontram-se bastante dispersos ao longo do intervalo compreendido entre 0 e 0,5%. Nesse sentido, observa-se que as finanças da CAESB_DESC são mais vulneráveis, tendo em vista que essa companhia recorre, de modo mais frequente, a restrições de uso da água e dispense maiores investimentos em obras de infraestrutura (Figura 6.3a e 6.4a).

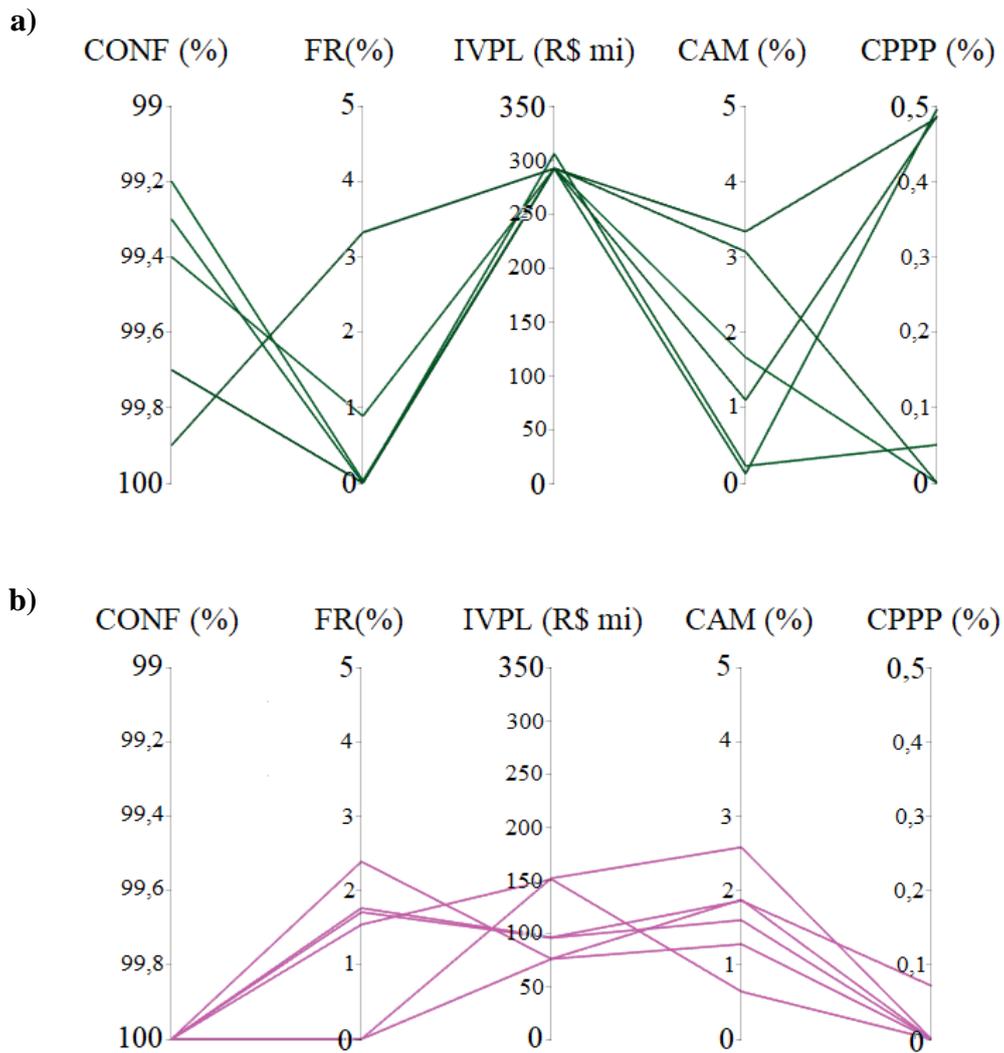


Figura 6.3 - Performance das companhias (a) CAESB_DESC e (b) CAESB_TSM nas políticas correspondentes à formulação I (modelo com fundo de contingência) que atendem aos critérios de desempenho estabelecidos ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$).

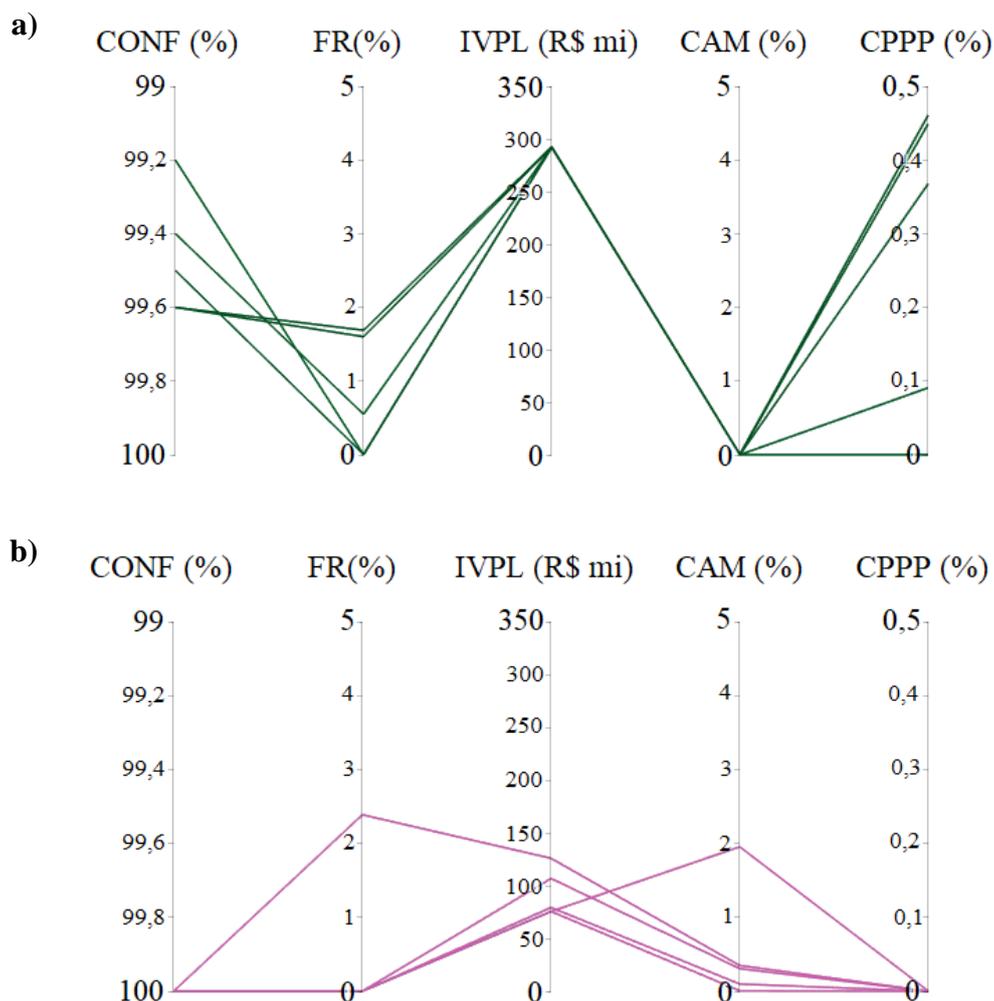


Figura 6.4 - Performance das companhias (a) CAESB_DESC e (b) CAESB_TSM nas políticas correspondentes à formulação II (modelo sem fundo de contingência) que atendem aos critérios de desempenho estabelecidos ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$).

Apesar das diferenças identificadas entre o desempenho das companhias, ambas possuem em comum a necessidade de expandir suas respectivas infraestruturas de oferta de água ao longo do horizonte de planejamento, dado que o valor presente líquido dos custos associados à construção de novas infraestruturas foi superior a zero em todas as políticas otimizadas (terceiro eixo das Figuras 6.3 e 6.4). Todavia, observa-se que a companhia CAESB_DESC dispense investimentos significativamente maiores do que aqueles realizados pela CAESB_TSM. Nas duas formulações, tem-se que os custos relacionados à construção/expansão de infraestrutura por parte da companhia CAESB_DESC oscilam próximos a R\$ 300 milhões (Figura 6.3a e 6.4a), ao passo que os investimentos realizados pela CAESB_TSM concentram-se abaixo de R\$ 150 milhões (Figura 6.3b e 6.4b). Tal fato decorre do porte e da complexidade dos projetos relacionados à CAESB_DESC, cuja captação de água ocorre em reservatório muito mais distante (Corumbá IV) e cujas vazões

de tratamento associadas são superiores às dos empreendimentos desenvolvidos pela companhia CAESB_TSM.

Para as próximas análises, foram selecionadas apenas as políticas sem fundo de contingência que atendem aos critérios de desempenho (Figura 6.4), visto que estas apresentaram performance ligeiramente superior àquelas obtidas pela formulação I (Figura 6.3). Além de terem apresentado melhor desempenho, tais políticas representam, de forma mais adequada, a realidade atual da CAESB, que não dispõe de fundo de contingência. Como ao todo são 5 políticas, estas foram denominadas de “A”, “B”, “C”, “D” e “E”, identificadas na Figura 6.5.

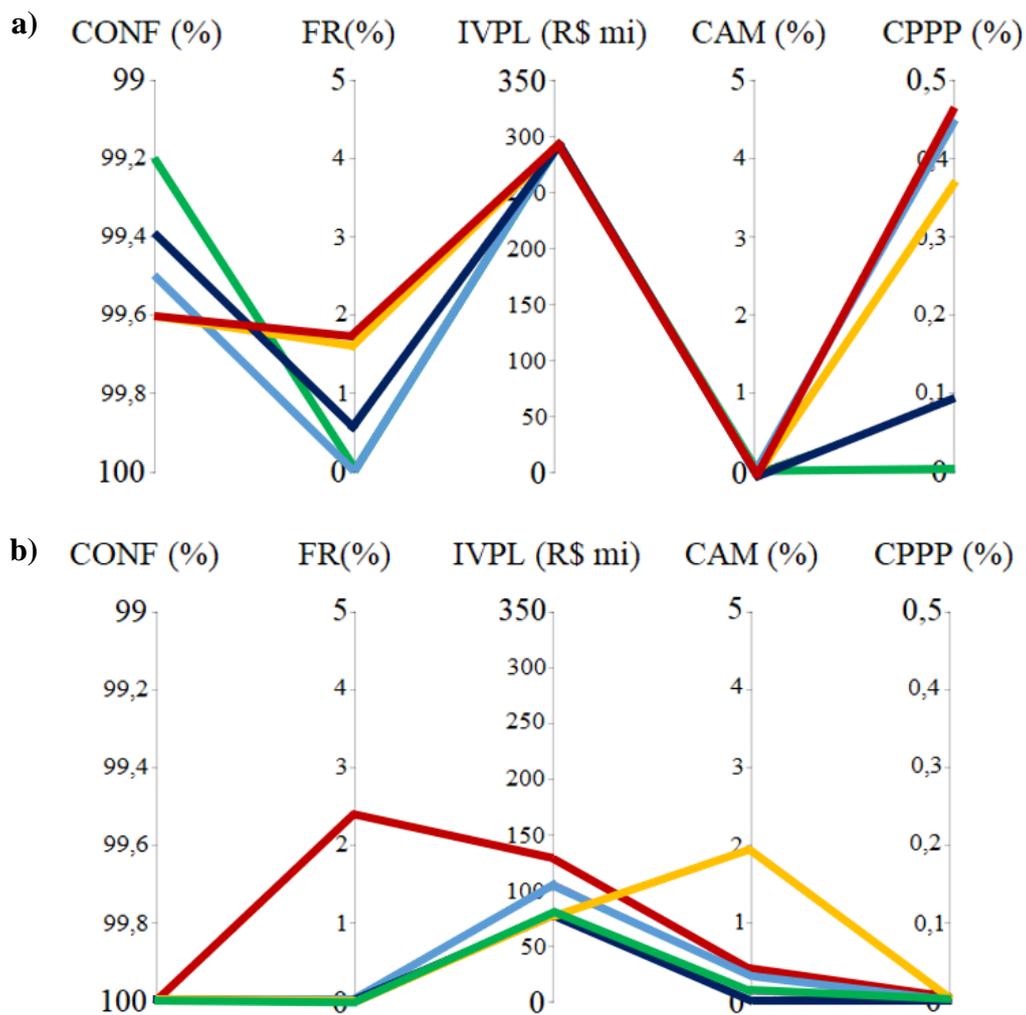


Figura 6.5 – Políticas “A” (verde), “B” (azul claro), “C” (amarelo), “D” (azul escuro) e “E” (vermelho) selecionadas para as próximas análises. No painel (a), é apresentado o desempenho da companhia CAESB_DESC nas respectivas políticas, enquanto no painel (b), apresenta-se o desempenho da CAESB_TSM.

6.2 – VARIÁVEIS DE DECISÃO DAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO

Na Figura 6.6, são apresentadas as decisões ou estratégias que compõem as cinco políticas de abastecimento urbano da otimização sem fundo de contingência. Conforme detalhado no item 4.2.2.1 (Tabelas 4.24 a 4.26), tais políticas compreendem: (1) os limiares/gatilhos de RdF que governam a implementação de medidas de curto prazo (Figura 6.6a, 6.6b e 6.6c) e os investimentos de longo prazo em projetos de infraestrutura (Figura 6.6d); e (2) a ordem de construção das infraestruturas (Tabela 6.1). Esses dois itens correspondem às regras de decisão que definem as políticas de abastecimento urbano. Observa-se que nos gráficos 6.6(b), (c) e (d), os limiares da política “B” praticamente coincidem com os da política “C” e, por isso, não é possível visualizá-la com nitidez.

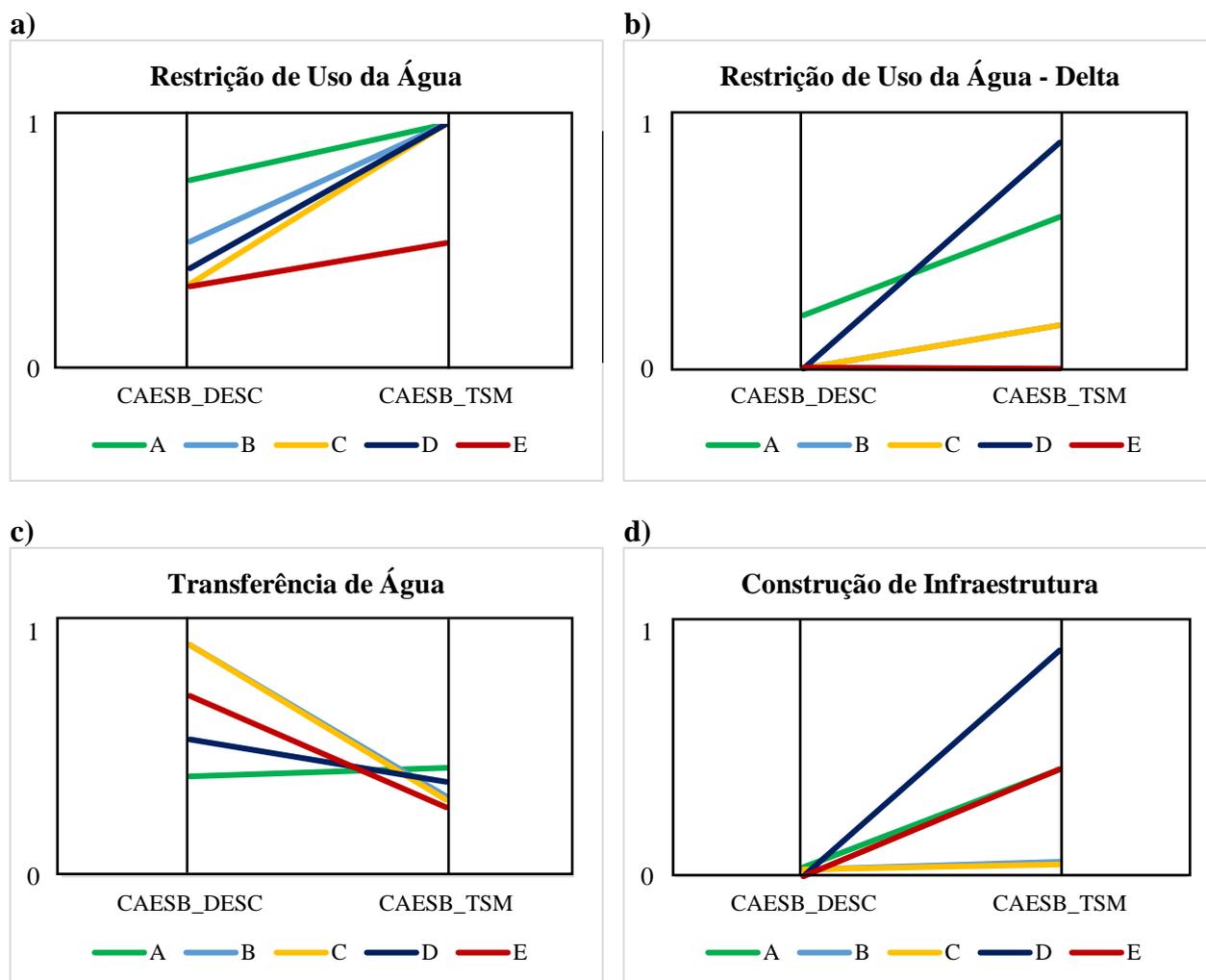


Figura 6.6 - Variáveis de decisão associadas às políticas “A”, “B”, “C”, “D” e “E” (formulação II – modelo sem fundo de contingência).

No eixo “y”, são apresentados os valores dos limiares de risco referentes a cada variável de decisão, ao passo que no eixo “x” são apresentadas as companhias correspondentes. Inicialmente, cabe destacar que quanto mais baixo o limiar de RdF (mais próximo de zero no eixo “y” da Figura 6.6), maior tende a ser o uso das alternativas em questão (restrições, transferências e construção de infraestrutura), visto que estas são implementadas quando a métrica de RdF de curto e de longo prazo excede tais limiares. Desse modo, quanto menor o limiar, mais facilmente (e frequentemente) a métrica de RdF irá ultrapassar o seu valor.

Tabela 6.1 - Ordem de construção das infraestruturas hídricas nas políticas “A”, “B”, “C”, “D” e “E” (formulação II – modelo sem fundo de contingência).

Observação: As etapas 2 e 3 do Sistema Corumbá e Paranoá englobam as anteriores quando apontadas como a primeira opção na ordem de construção.

Companhia	Infraestrutura	Políticas - Ordem de Construção				
		A	B	C	D	E
CAESB_DESC	Sistema Corumbá – Etapa 1	-	-	-	-	-
	Sistema Corumbá – Etapa 2	1	2	1	1	1
	Sistema Corumbá – Etapa 3	2	1	2	3	2
	Barragem do Descoberto - Expansão	3	3	3	2	3
CAESB_TSM	Sistema Paranoá – Etapa 1	-	-	-	-	-
	Sistema Paranoá – Etapa 2	-	1	-	-	1
	Sistema Paranoá – Etapa 3	1	2	1	1	2

Observa-se que todas as políticas possuem limiares de restrição de uso da água moderados a elevados (Figura 6.6a), sobretudo no que tange à companhia CAESB_TSM. Isso indica que as restrições são implementadas com baixa frequência, o que já era esperado, dado que a frequência de restrição das políticas foi limitada à 5% (em média, uma vez a cada 20 anos). Todavia, observa-se que quando as restrições são implementadas, rapidamente evoluem para os estágios mais restritivos, cujo percentual de redução sobre a demanda da companhia é maior. Tal fato é constatado a partir dos baixos limiares de delta evidenciados na Figura 6.6b, os quais estão associados ao desencadeamento do segundo e terceiro estágios da política de restrição (vide seção 4.1.2.4). Desse modo, observa-se que, apesar de infrequentes, as restrições são utilizadas em sua capacidade máxima. Esse efeito, por sua vez, talvez seja um artefato do *overfitting* (ajuste não parcimonioso) das políticas às séries temporais, tendo em vista que a variabilidade suave de tais séries entre os anos simulados

favorece a adequação de restrições curtas e severas em detrimento de restrições mais frequentes e suaves relacionadas a estratégias de prevenção.

Evidenciam-se também importantes relações complementares entre as restrições de uso da água e as transferências de água (Figuras 6.6a e 6.6c). A companhia CAESB_TSM, apesar de implementar restrições apenas na política “E”, faz bastante requisições de transferências de água à CAESB_DESC, visto que todas as políticas apresentaram menores limiares de transferências de água (Figura 6.6c). Do mesmo modo, observa-se nos resultados da CAESB_DESC que as políticas cujo uso de restrições é menor (maior limiar), a solicitação de transferências à CAESB_TSM é maior (menor limiar) e vice-versa. Conclui-se, portanto, que as transferências foram eficazes em reduzir a necessidade de implementação das restrições e constituem um importante instrumento de gestão dos Sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria, atualmente já utilizado pela CAESB. Além disso, o fato de as políticas priorizarem transferências em detrimento de restrições demonstra que o otimizador identificou o primeiro instrumento como uma solução mais vantajosa para mitigar os impactos das secas e que, caso a CAESB_DESC e a CAESB_TSM fossem de fato duas empresas de saneamento distintas, haveria necessidade de cooperação entre elas por meio de transferências, a fim de se chegar a políticas que otimizassem o desempenho de ambas.

Ainda nesse contexto, constata-se que, de modo geral, a companhia CAESB_TSM consegue otimizar o seu desempenho apenas com as transferências de água recebidas do Descoberto, ao passo que a CAESB_DESC precisa fazer uso tanto de restrições de uso da água quanto de transferências para otimizá-lo. Tal fato corrobora a maior vulnerabilidade das localidades atualmente atendidas pelo Sistema Descoberto, as quais estão mais sujeitas a restrições de uso da água e ainda possuem menor capacidade adaptativa.

Com relação à construção de infraestruturas, observa-se que a companhia CAESB_DESC necessita de ampliar a sua capacidade de oferta logo no período inicial do horizonte de simulação, dados os baixíssimos limiares apresentados por todas as políticas na Figura 6.6d. Esse resultado reforça ainda mais a importância da construção de novas infraestruturas para ampliar a capacidade de oferta da CAESB_DESC. A companhia CAESB_TSM, por sua vez, também demanda a ampliação de sua infraestrutura de oferta em todas as cinco políticas. Entretanto, os limiares elevados das políticas “A”, “D” e “E” indicam que, em alguns cenários, a necessidade de expansão da capacidade de oferta ocorreu apenas em período posterior, o que será melhor detalhado na seção 6.3.

Na Tabela 6.1, apresenta-se a ordem de construção de infraestrutura sugerida pelo otimizador no contexto de cada política. As numerações apresentadas não indicam que tais infraestruturas foram todas construídas na política em questão, apenas apontam que a respectiva ordem de construção seria a mais vantajosa no caso de uma possível necessidade de ampliação do volume de água ofertado. Desse modo, constata-se que as cinco políticas se assemelham quanto à primeira opção de infraestrutura sugerida pelo otimizador para ser construída por cada companhia. No caso da CAESB_DESC, quatro das cinco políticas apontaram que a construção conjunta das etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá (descrita como “Sistema Corumbá – Etapa 2” na Tabela 6.1) deveria ser a primeira opção a ser implantada pela companhia, ao passo que três políticas da CAESB_TSM evidenciaram que a construção conjunta de todas as etapas do Sistema Paranoá (descrita como “Sistema Paranoá – Etapa 3” na Tabela 6.1) deveria ser a primeira opção. Tal fato sugere que essas duas opções são as mais indicadas para suprir a demanda de água das companhias quando se detectar uma eventual necessidade de ampliação da capacidade de oferta do sistema.

Dada a relevância da expansão da capacidade de oferta do sistema, no tópico a seguir serão abordadas, em maiores detalhes, as infraestruturas implantadas em cada uma das políticas e seus respectivos momentos de construção.

6.3 – ANÁLISE DAS INFRAESTRUTURAS CONSTRuíDAS NAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO

Conforme apresentado no item 4.1.2.2, a modelagem desse estudo de caso compreende sete opções de ampliação da infraestrutura de oferta de água: quatro estão associadas à companhia CAESB_DESC e três, à companhia CAESB_TSM, cujas respectivas descrições e vazões de produção foram apresentadas na Tabela 4.10. Vale mencionar novamente que as três etapas que constituem o Sistema Corumbá e o Sistema Paranoá podem ser implementadas isoladamente ou conjuntamente, a depender da necessidade de ampliação da oferta verificada pelo WaterPaths. É possível, portanto, que o sistema construa as etapas 1, 2 e 3 sequencialmente, ou as etapas 1 e 2 conjuntamente, ou as etapas 1, 2 e 3 de uma só vez, pois o sistema entende que pode haver necessidade de expandir a oferta de água com adição de volume de forma sequencial ou conjunta.

As cinco políticas sem fundo de contingência que atendem aos critérios de desempenho estabelecidos ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$) são analisadas a

seguir quanto às respectivas infraestruturas construídas ao longo dos 40 anos simulados. Cabe destacar que as políticas obtidas a partir das formulações I e II do portfólio de abastecimento apresentaram resultados semelhantes quanto às infraestruturas implementadas ao longo do horizonte simulado. Tal fato é esperado, dado que a existência ou não de um fundo de contingência não interfere na eventual necessidade de ampliação da capacidade de oferta, a qual é influenciada pelo comportamento de outros fatores, como as variáveis hidrológicas (e.g. vazão e evaporação) e a demanda de água.

Na Tabela 6.2, são apresentadas informações sobre a construção de cada opção de infraestrutura em relação ao total de políticas (cinco) e ao total de cenários simulados (cada política foi analisada sob 1.000 cenários distintos de vazão, evaporação, demanda e incertezas profundas). Observa-se que, para a companhia CAESB_DESC, as combinações de infraestruturas construídas foram as seguintes:

- Sistema Corumbá – 1^a + 2^a etapa: construção conjunta das etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá, de modo a ampliar a produção de água da companhia em 2.800 l/s;
- Sistema Corumbá – 3^a etapa: construção da etapa 3 do Sistema Corumbá (após a construção conjunta das etapas 1 e 2), de modo a ampliar a produção de água da companhia em 1.200 l/s;
- Sistema Corumbá – 1^a + 2^a + 3^a etapa: construção conjunta das etapas 1, 2 e 3 do Sistema Corumbá, de modo a ampliar a produção de água da companhia em 4.000 l/s;
- Expansão da barragem do Descoberto: ampliação da produção de água da companhia em 400 l/s.

Quanto à CAESB_TSM, as combinações de infraestruturas construídas foram as seguintes:

- Sistema Paranoá – 1^a + 2^a etapa: construção conjunta das etapas 1 e 2 do Sistema Paranoá, de modo a ampliar a produção de água da companhia em 1.400 l/s;
- Sistema Paranoá – 3^a etapa: construção da etapa 3 do Sistema Paranoá (após a construção conjunta das etapas 1 e 2), de modo a ampliar a produção de água da companhia em 700 l/s;
- Sistema Paranoá – 1^a + 2^a + 3^a etapa: construção conjunta das etapas 1, 2 e 3 do Sistema Paranoá, de modo a ampliar a produção de água da companhia em 2.100 l/s.

No que tange à companhia CAESB_DESC, observa-se, na Tabela 6.2, a notável predominância das etapas 1 e 2 do Sistema Produtor Corumbá, as quais foram construídas conjuntamente em 100% dos cenários de todas as cinco políticas. Tal empreendimento contribui com um aporte de 2.800 l/s de água tratada para a companhia CAESB_DESC, o que representa um importante reforço ao Sistema Produtor Descoberto. Os demais projetos, por sua vez, foram executados em uma parcela ínfima de cenários (<0,3%), evidenciando que a construção conjunta das duas primeiras etapas do Sistema Corumbá se apresentou como a opção mais vantajosa de ampliação do volume de água ofertado pela companhia CAESB_DESC nos próximos 40 anos.

Tabela 6.2 - Estatística de construção de cada opção de infraestrutura nas políticas sem fundo de contingência que atendem aos critérios de desempenho.

	Empreendimento	Política(s) em que foi construído	Número de cenários em que foi construído na respectiva política	Percentual de cenários em que foi construído na respectiva política
CAESB_DESC	Sistema Corumbá – 1ª + 2ª etapa	A	1.000	100%
		B	999	99,9%
		C	1.000	100%
		D	1.000	100%
		E	1.000	100%
	Sistema Corumbá – 3ª etapa	E	2	0,2%
	Sistema Corumbá – 1ª + 2ª + 3ª etapa	B	1	0,1%
Expansão da barragem do Descoberto	D	3	0,3%	
CAESB_TSM	Sistema Paranoá – 1ª + 2ª etapa	B	1.000	100%
		E	1.000	100%
	Sistema Paranoá – 3ª etapa	B	352	35,2%
		E	657	65,7%
	Sistema Paranoá – 1ª + 2ª + 3ª etapa	A	1.000	100%
		C	1.000	100%
D		1.000	100%	

Quanto à companhia CAESB_TSM, observa-se que todas as três etapas do Sistema Paranoá são de grande relevância para suprir a demanda das localidades atendidas pelo atual sistema integrado Torto/Santa Maria nos próximos 40 anos, tendo em vista o elevado percentual de cenários em que foram implantadas. Nota-se que a construção de sua versão completa nas políticas “A”, “C” e “D” ocorreu em 100% dos cenários simulados. Tal fato também se

aplica à construção conjunta das etapas 1 e 2 nas políticas “B” e “E”. Quanto à 3ª etapa, esta foi construída em 35,2% e 65,7% dos cenários dessas duas últimas, respectivamente.

Os resultados apresentados na Tabela 6.2 evidenciam que a construção conjunta dos empreendimentos associados aos Sistemas Corumbá e Paranoá é recomendada para diminuir os riscos de desabastecimento, seja das primeiras duas etapas ou de todas as três. Tais combinações foram avaliadas, portanto, como as mais vantajosas para suprir o aumento contínuo da demanda e consequente necessidade de ampliação da produção de água tratada.

Para fins de melhor compreensão quanto à cronologia de execução dos projetos de infraestrutura implementados pelas duas companhias, apresentam-se os resultados da Tabela 6.2 na forma de gráficos, os quais constam na Figura 6.7. Tais gráficos evidenciam as opções de infraestruturas construídas pelas companhias CAESB_DESC (coluna da esquerda) e CAESB_TSM (coluna da direita) entre 2020 e 2059 (40 anos de simulação – eixo horizontal) em cada um dos 1.000 cenários simulados. Cada cenário é representado por uma linha horizontal, cujas mudanças de cores indicam as infraestruturas construídas em diferentes momentos do horizonte de planejamento. Desse modo, cada gráfico da Figura 6.7 é composto por 1.000 linhas (1.000 cenários), as quais foram agregadas verticalmente (uma em cima da outra). A transição de cor em cada linha indica o momento em que uma nova opção de infraestrutura entra em operação. Por exemplo, na Figura 6.7a, tem-se que o empreendimento referente à construção conjunta das etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá (cor roxa) entra em operação no quinto ano do horizonte de planejamento (2025) na maior parte dos cenários simulados e próximo ao sexto ano nos demais cenários (localizados na parte superior da Figura 6.7a). Por fim, tem-se que a região preenchida pela cor cinza nos gráficos da Figura 6.7 corresponde à situação atual (status quo) das companhias.

Algumas conclusões interessantes são obtidas a partir dos resultados apresentados na Figura 6.7. Inicialmente, observa-se que todas as políticas apresentam comportamento bastante semelhante no que diz respeito aos empreendimentos executados pela companhia CAESB_DESC, tanto em relação à opção de infraestrutura construída quanto ao momento em que sua respectiva operação é iniciada. Nota-se que, em todas as cinco políticas, as etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá (cor roxa) passaram a operar próximo ao quinto ano da simulação. Em alguns cenários, a operação desse empreendimento é iniciada ligeiramente depois (sexto ou sétimo ano). Resta evidente, portanto, que próximo ao ano de 2025 um novo aporte de água será necessário para suprir a demanda das localidades abastecidas pelo atual Sistema

Produtor Descoberto. Essa sinalização é bastante coerente com estudos recentes do Plano Distrital de Saneamento Básico (GDF, 2017b), os quais constataram a necessidade de implantação das etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá até o ano de 2030, a fim de que o Sistema Descoberto possua capacidade de produção e disponibilidade hídrica suficiente para atender a demanda projetada para 2037, termo final do horizonte simulado no referido plano.

O incremento de 2.800 l/s na produção de água tratada proporcionado pelo referido empreendimento (etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá) é bastante eficaz em reduzir permanentemente o RdF de longo prazo da CAESB_DESC em todas as cinco políticas, evitando a necessidade de se investir em novas expansões da capacidade de oferta até o final de 2059. Tal fato é constatado nas Figuras 6.8 a 6.12, disponíveis ao final dessa seção, nas quais se apresenta a evolução temporal de variáveis do sistema correspondentes à CAESB_DESC (coluna da esquerda) e à CAESB_TSM (coluna da direita) em múltiplos cenários simulados (cada linha vermelha representa um cenário). Conforme se observa na Figura 6.8, a capacidade de tratamento da CAESB_DESC é ampliada próximo à semana de número 250 (vide “capacidade de tratamento”, coluna da esquerda), o que decorre do aporte de água fornecido pela implantação do Sistema Corumbá. Logo em seguida, o RdF de longo prazo da companhia diminui para zero e assim permanece até o final da simulação (vide “RdF de longo prazo” da CAESB_DESC). O mesmo ocorre nas demais políticas (Figuras 6.9 a 6.12). A construção das etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá demonstra-se, portanto, suficiente para suprir a demanda de água da companhia até o ano de 2059.

Do mesmo modo, esse aporte também é eficaz em manter os cálculos da métrica de RdF de curto prazo próximos de zero até a chegada dos últimos cinco anos do horizonte de planejamento, próximo a semana de número 1800 (vide “RdF de curto prazo” da CAESB_DESC nas Figuras 6.8 a 6.12). Nesses anos finais, o risco de curto prazo da companhia se eleva, ocasião em que alternativas menos dispendiosas e mais imediatas, como transferências (todas as políticas) e restrições (políticas “C”, “D” e “E”), são implementadas pela companhia, as quais possibilitam postergar os elevados investimentos em projetos de infraestrutura. Tais resultados evidenciam, portanto, o caráter complementar das medidas de curto e de longo prazo, dado que a integração dessas estratégias viabiliza que ambas sejam exploradas nos momentos mais oportunos e de forma ponderada. Isso, por sua vez, resulta na elaboração de portfólios de gestão e planejamento dos sistemas hídricos urbanos menos onerosos e mais confiáveis.

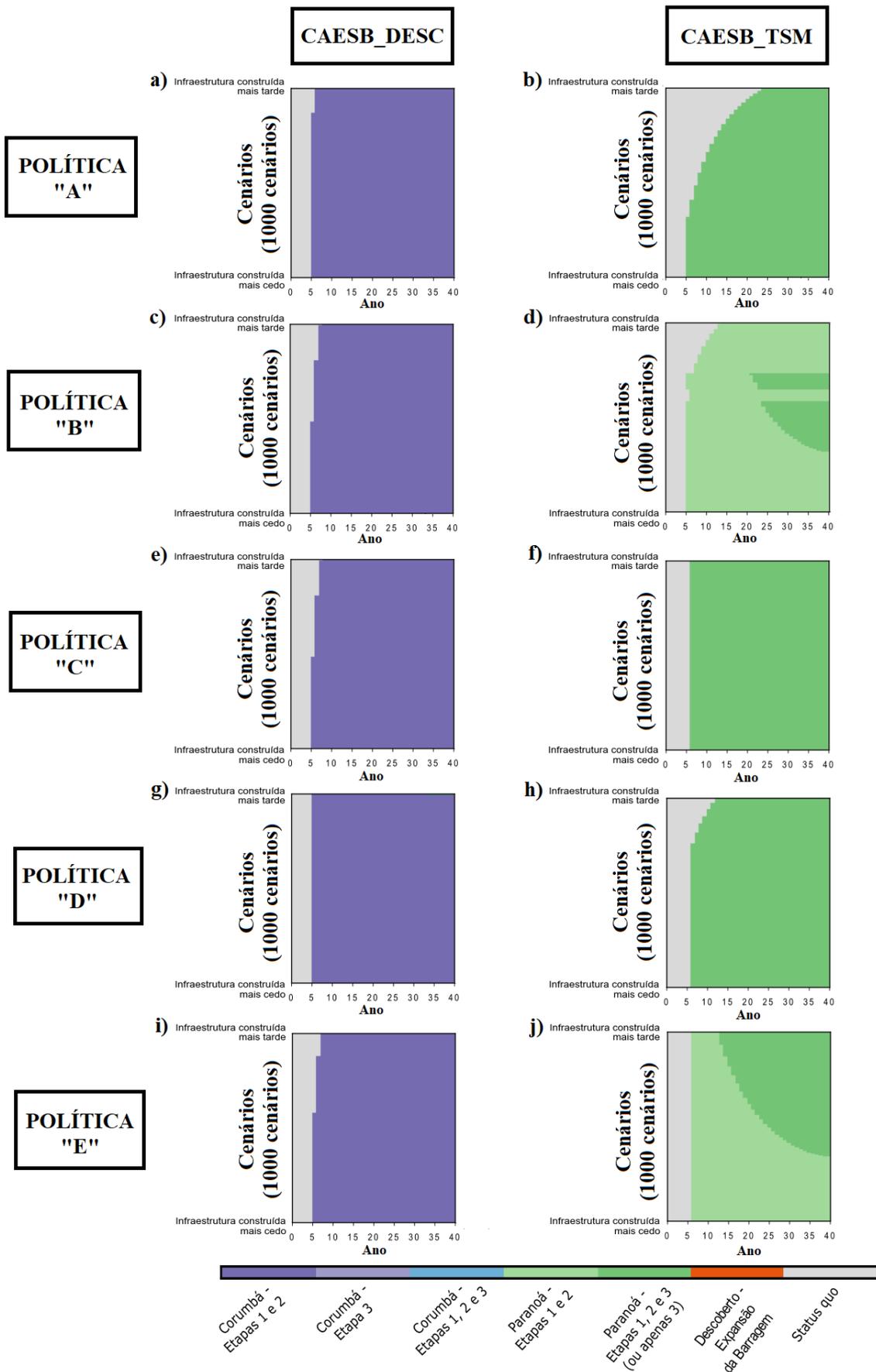


Figura 6.7 – Projetos de infraestrutura de oferta de água implementados pelas companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM nas políticas "A", "B", "C", "D" e "E".

Um aspecto importante referente aos investimentos em infraestruturas corresponde ao tempo necessário para obtenção de suas respectivas licenças. Tal prazo pode fazer com que a construção de uma opção de infraestrutura seja adiada em favor de outra opção com licença já concedida, o que resulta em uma ordem de construção observada distinta daquela especificada na política. É o que ocorre na política “B”, na qual a construção conjunta das etapas 1, 2 e 3 do Sistema Corumbá é acionada antes do prazo de emissão da licença referente à etapa 3 (5 anos) ter transcorrido por completo. Constatou-se, na Tabela 6.2, que a configuração completa do Sistema Corumbá foi o primeiro empreendimento acionado pelo modelo (Sistema Corumbá – Etapa 3). Todavia, este não pôde ser construído naquele momento em virtude da não conclusão do prazo de concessão da licença referente à terceira etapa, o que desencadeou a implantação das etapas 1 e 2 do Sistema Corumbá (Figura 6.7c – cor roxa). Tendo em vista que após a construção dessas duas etapas o RdF de longo prazo da CAESB_DESC manteve-se em zero permanentemente (vide “RdF de longo prazo” da CAESB_DESC na Figura 6.9), não houve necessidade de posterior implantação da terceira etapa desse Sistema.

Quanto aos demais projetos de infraestrutura pertencentes à CAESB_DESC, não é possível visualizá-los nos gráficos das Figuras 6.7(a), (c), (e), (g) e (i) pelo fato de terem sido implementados em uma quantidade ínfima de cenários, conforme evidenciado na Tabela 6.2.

Com relação à CAESB_TSM, observa-se que os momentos cujas novas infraestruturas entram em operação variam um pouco mais (Figuras 6.7b, d, f, h, j). As políticas “A”, “C” e “D”, que constroem as três etapas do Sistema Paranoá (cor verde escuro) de uma só vez, o fazem parcialmente em momentos distintos. Todavia, observa-se que tais expansões da capacidade de produção de água tornam-se necessárias a partir do quinto ano do horizonte de simulação em quase todos os cenários (Figuras 6.7b, f, h). As políticas “C” e “D” possuem maior convergência nesse aspecto, visto que a operação do Sistema Paranoá em sua configuração máxima é iniciada próximo ao ano de 2026 na maior parte dos cenários simulados. De modo similar, as políticas “B” e “E” iniciam a operação das etapas 1 e 2 (cor verde claro) predominantemente no quinto e no sexto ano do horizonte de planejamento, conforme evidenciado nas Figuras 6.7d e 6.7j, ao passo que executam, em alguns cenários, a terceira etapa (cor verde escuro) após o ano de 2030. Em síntese, o que se observa como tendência geral nos gráficos da CAESB_TSM é que, próximo ao ano de 2025, há necessidade de se expandir a capacidade de produção de água tratada do Torto/Santa Maria em pelo menos 1.400 l/s, a fim de assegurar o atendimento de sua demanda futura.

No que tange ao comportamento do RdF de longo prazo da CAESB_TSM, observa-se que, ao final do horizonte de simulação, o valor da métrica é bastante elevado em alguns cenários das políticas “B”, “C” e “E” (vide “RdF de longo prazo” da CAESB_TSM nas Figuras 6.9, 6.10, 6.12), apesar do aumento da capacidade de produção fornecido pela ampliação Sistema Paranoá. Tal fato indica à companhia que possivelmente haverá necessidade de se realizar outros investimentos em projetos de infraestrutura. Essa sinalização condiz com os estudos desenvolvidos no Plano Distrital de Saneamento Básico (GDF, 2017b), os quais constataram a necessidade de implantação da configuração completa do Sistema Paranoá até o ano de 2034, a fim de assegurar que o Sistema Torto/Santa Maria tenha capacidade de produção e disponibilidade hídrica suficiente para atendimento de sua demanda.

Tendo em vista que o termo final do horizonte simulado nessa pesquisa ocorre 23 anos após o término do horizonte do PDSB (GDF, 2017b), é interessante que se estude a possibilidade de obtenção de maiores outorgas de abastecimento urbano no Lago Paranoá, a fim de viabilizar maior produção de água tratada nas ETAs Lago Sul e Lago Norte, ou que se considere ampliar o volume ofertado por meio de captação em novos mananciais. Outra avaliação pertinente consiste na possibilidade de ampliação da capacidade de tratamento da ETA Brasília, responsável pelas águas provenientes da represa de Santa Maria, do Ribeirão Bananal e do Ribeirão do Torto, tendo em vista que as outorgas de abastecimento referentes a esses três corpos hídricos ultrapassam a referida capacidade de tratamento. Estratégias voltadas à gestão da demanda, tais como reuso de águas cinzas e captação de água de chuva, também são relevantes, inclusive para o sistema mantido pelo Descoberto, pois tais alternativas contribuem com a preservação e o uso eficiente dos recursos hídricos (Estevan, 1999). Nesse contexto, a Lei Distrital nº 4.671/2011 dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação de reservatórios de captação de água da chuva para novos empreendimentos imobiliários com área construída superior a 300 m².

De modo geral, as políticas de gestão e planejamento dos sistemas de abastecimento urbano identificadas nesse estudo de caso se sustentam mais sobre a construção de infraestruturas do que sobre as medidas de curto prazo (restrições e transferências), o que corrobora a necessidade de expansão da capacidade de oferta nos próximos 40 anos, a fim de que a demanda futura seja adequadamente atendida. Todavia, é importante mencionar que o procedimento adotado para gerar as séries temporais hidrológicas (vazão e evaporação) resultou em séries com variabilidade bastante suave entre os anos simulados, o que pode ter influenciado na subutilização dos instrumentos de mitigação das secas. Dado que tais séries

apresentam comportamentos semelhantes, a componente climática dos cenários sob os quais as políticas foram avaliadas carecem de condições diversas, o que faz com que as medidas de curto prazo (restrições e transferências) sejam utilizadas com menor frequência.

Tais medidas, no entanto, assumem caráter estratégico não apenas pelo fato de estarem prontamente disponíveis para mitigarem as secas, mas também por possibilitarem a postergação de elevados investimentos em novas infraestruturas. Observa-se, nas Figuras 6.8 a 6.12, que as restrições (vide “multiplicador de restrição”) e transferências (vide “volume transferido/recebido”) são imediatamente acionadas pelas companhias diante de condições desfavoráveis. No caso da companhia CAESB_DESC, tais instrumentos são utilizados no final do horizonte de planejamento (próximo à semana 2000), ocasião em que o volume disponível para abastecimento nos seus reservatórios se aproxima de zero (vide “volume disponível” da CAESB_DESC). Nesse período, a métrica de RdF de curto prazo da CAESB_DESC se eleva e ultrapassa os limiares de restrição (nas políticas “C”, “D” e “E”) e de transferência (em todas as políticas). Quanto à CAESB_TSM, tais instrumentos são utilizados logo no início da simulação (próximo à semana 250), ocasião em que a demanda supera 90% da capacidade de tratamento da companhia (vide “demanda efetiva” e “capacidade de tratamento” da CAESB_TSM) e a métrica de RdF de curto prazo ultrapassa os limiares de restrição (na política “E”) e de transferência (em todas as políticas). Tal fato sugere que os sistemas hídricos da CAESB_TSM atualmente operam já próximo à sua capacidade limite de produção. Entretanto, as transferências de água recebidas pela CAESB_TSM possibilitam que tal companhia adie a expansão de sua infraestrutura de oferta por pelo menos 2 anos (vide “capacidade de tratamento” da CAESB_TSM, a qual é ampliada apenas próximo à semana de número 400), o que ressalta o caráter complementar das estratégias de curto e de longo prazo.

POLÍTICA "A"

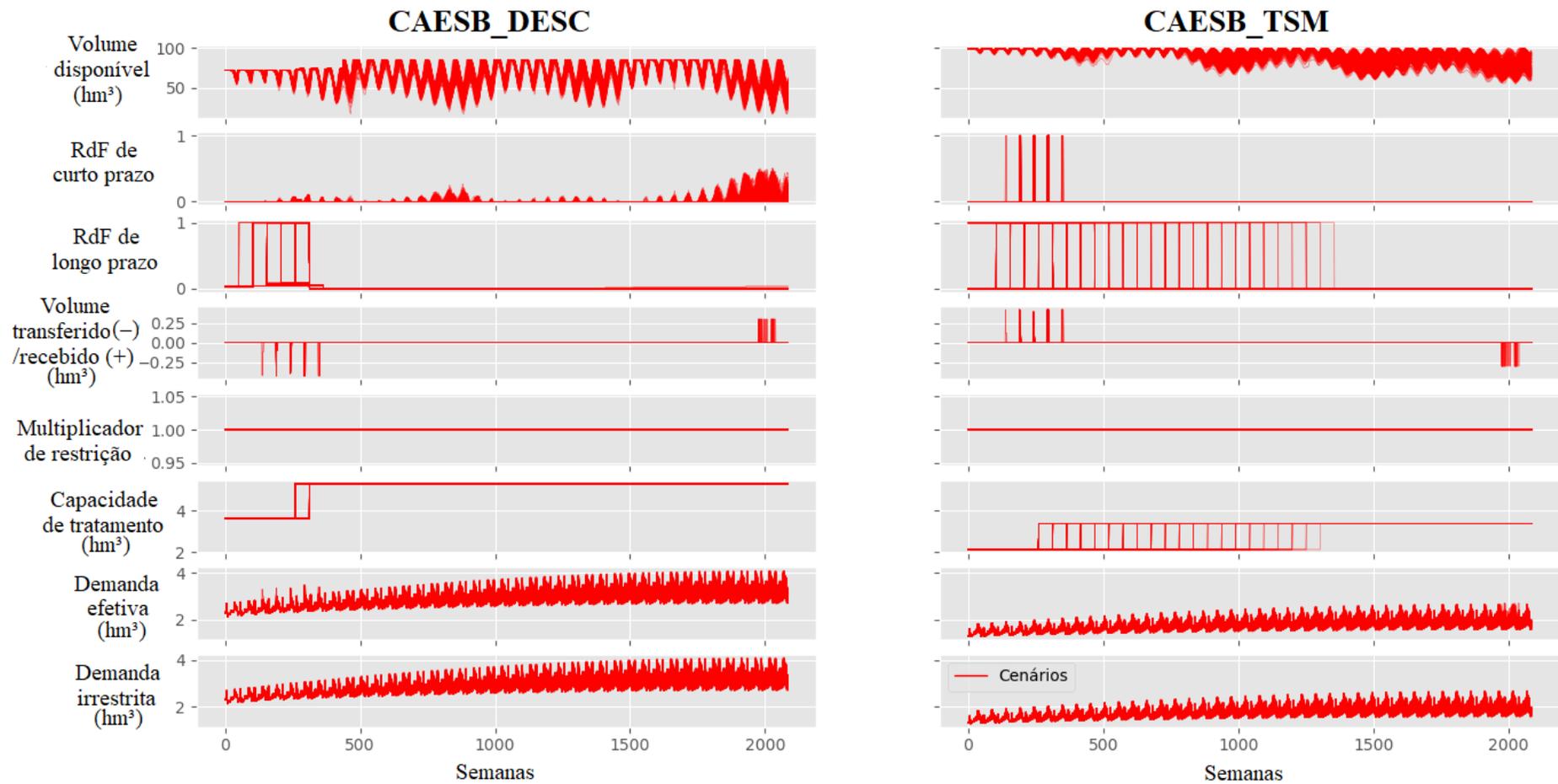


Figura 6.8 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "A". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.

POLÍTICA "B"

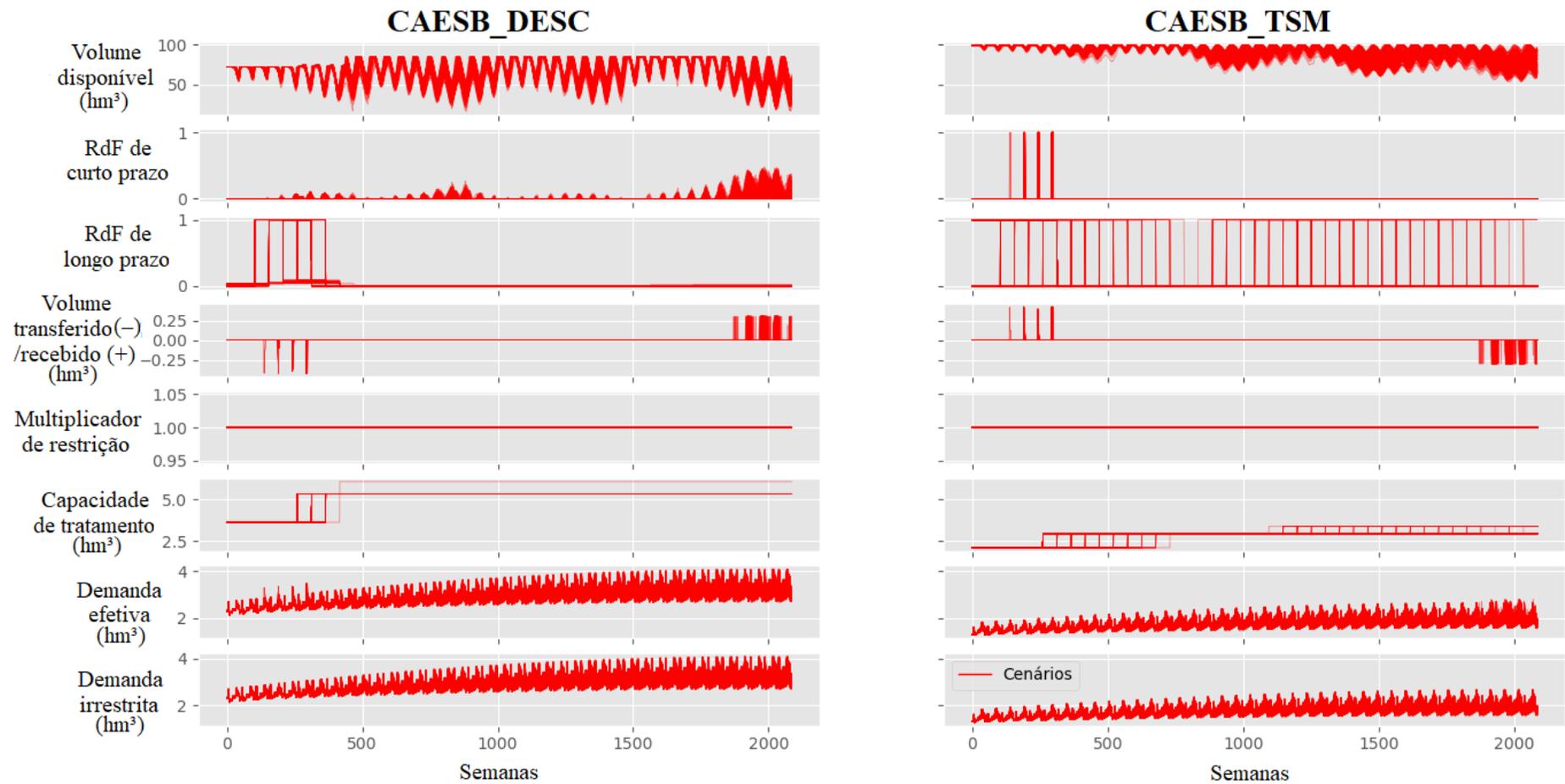


Figura 6.9 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "B". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.

POLÍTICA "C"

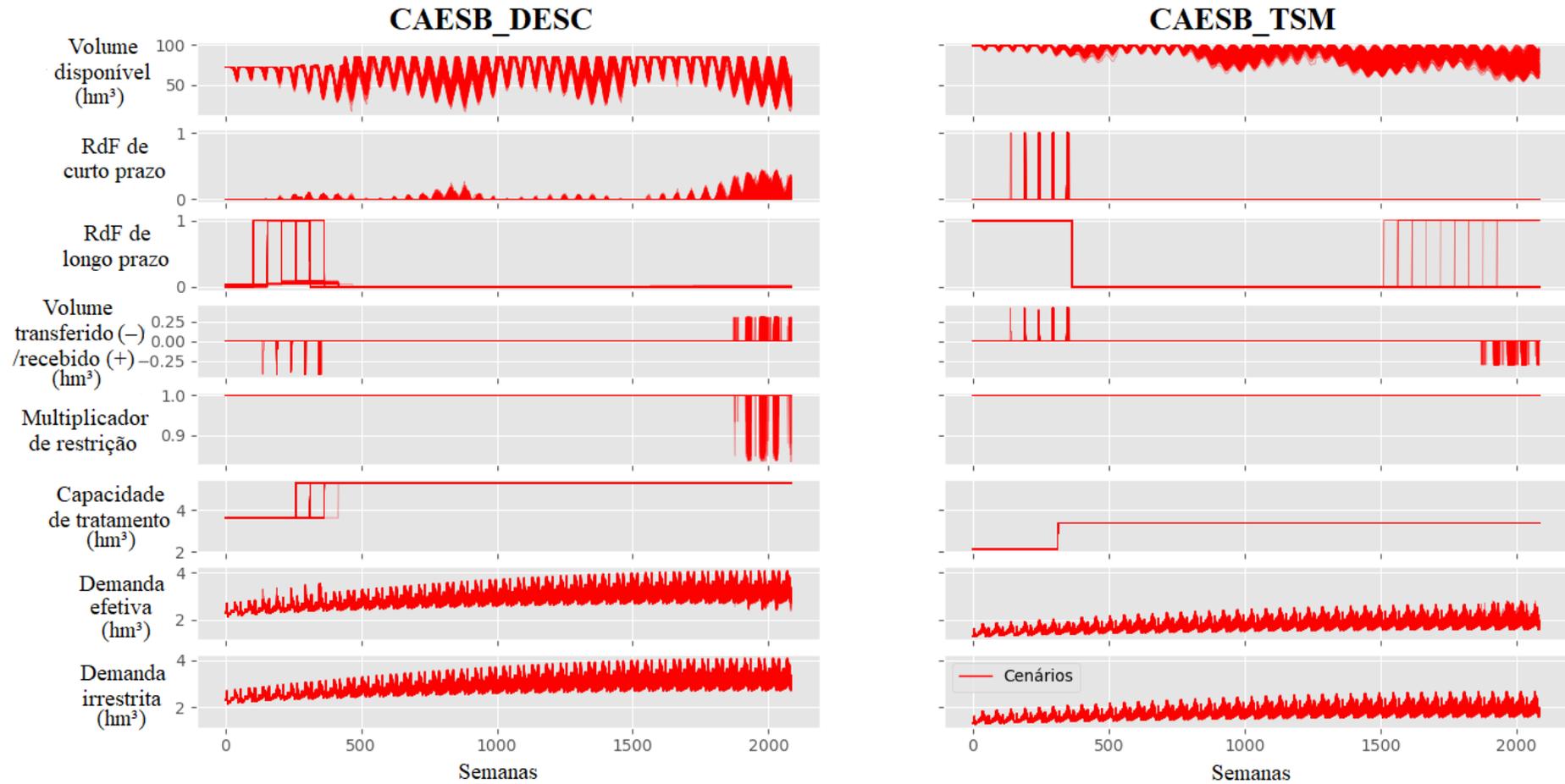


Figura 6.10 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "C". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.

POLÍTICA "D"

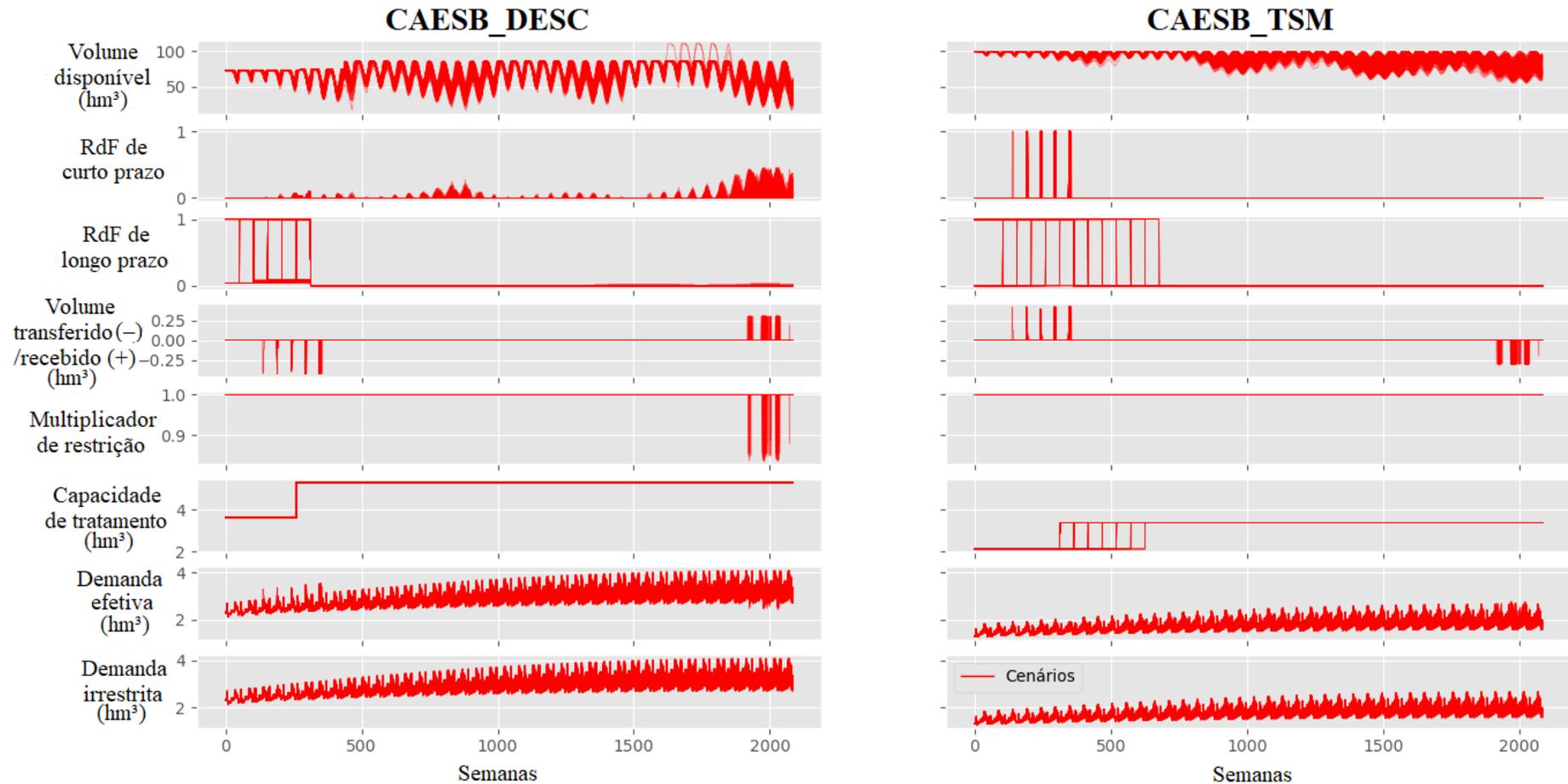


Figura 6.11 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "D". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.

Observação: no gráfico de “volume disponível” da CAESB_DESC, as poucas linhas vermelhas que atingem valores superiores a 100 hm³ (logo após a semana 1500) se referem aos cenários em que a opção de expansão da barragem do Descoberto é implementada pela companhia.

POLÍTICA "E"

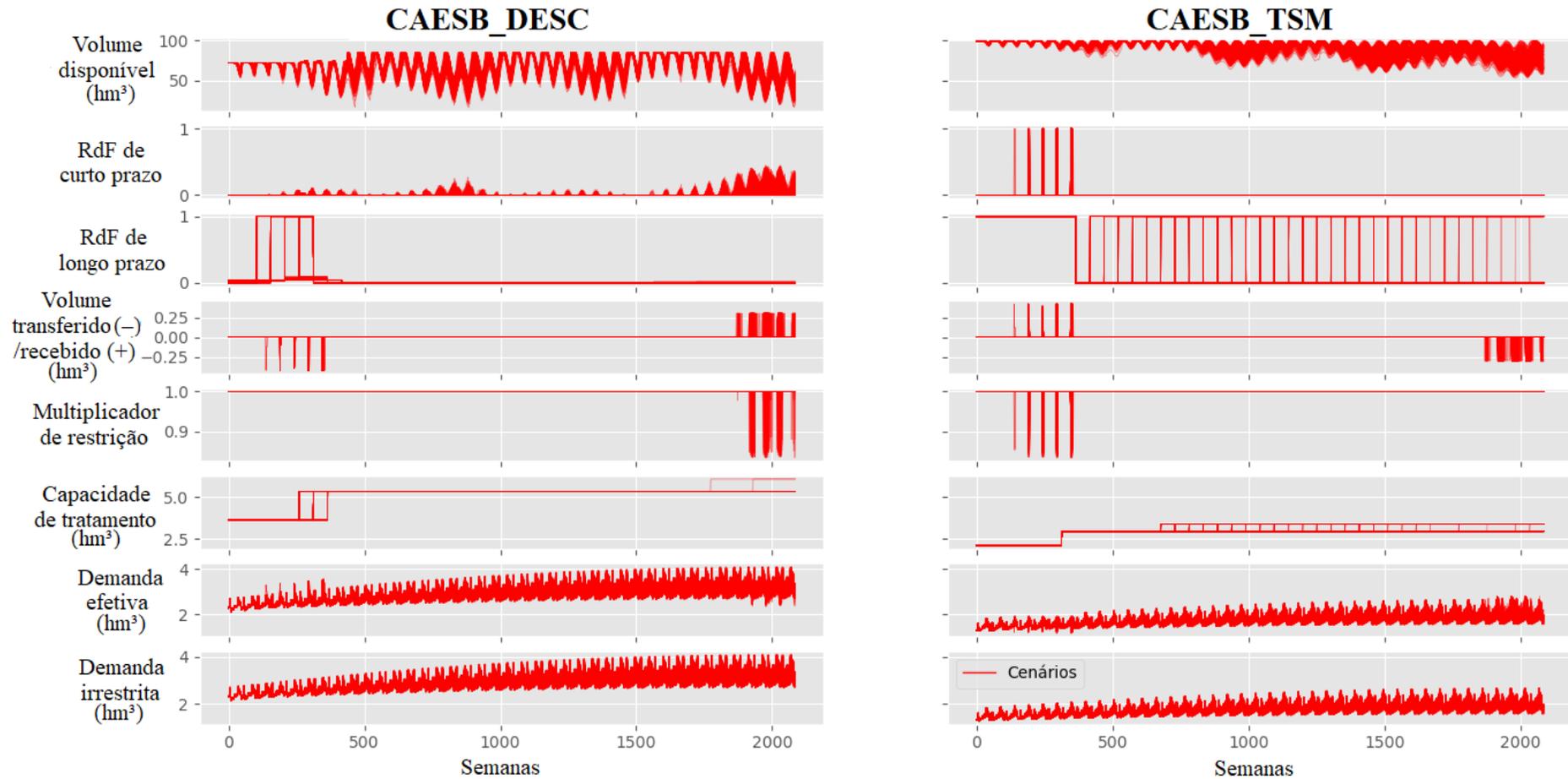


Figura 6.12 - Comportamento das variáveis do sistema correspondente à companhia CAESB_DESC e CAESB_TSM em 250 cenários simulados na política "E". Linhas transparentes indicam que poucos cenários apresentaram o mesmo comportamento.

6.4 – COMPORTAMENTO INDIVIDUAL DOS RESERVATÓRIOS NAS POLÍTICAS DE ABASTECIMENTO URBANO

Conforme apresentado no item 4.1.2.6, uma das condições de falha da métrica RdF tem como referencial o somatório dos volumes de água disponíveis em todos os reservatórios utilizados pela companhia. Quando esse volume atinge valores inferiores a 20% da capacidade máxima combinada do sistema em determinada(s) semana(s) do ano, é registrada a ocorrência de uma falha. Dado que a métrica RdF não analisa o risco de falha associado a cada reservatório individualmente, é importante que se avalie, nas cinco políticas selecionadas (“A”, “B”, “C”, “D” e “E”), o comportamento de seus respectivos níveis ao longo dos 40 anos, a fim de que suas reais condições de operação não sejam ocultadas.

Nas Figuras 6.12 (políticas “A” e “B”) e 6.13 (políticas “C”, “D” e “E”), é apresentado o volume disponível (hm^3) em cada reservatório ao longo do tempo, suas vazões afluentes ($\text{hm}^3/\text{semana}$) e respectivas demandas associadas (hm^3). Cada linha vermelha representa o comportamento dessas variáveis em um cenário específico. Nota-se que a evolução do volume e da demanda atendida por cada reservatório é bastante similar em todas as políticas, ao passo que a da vazão afluyente é igual (afinal, as séries de vazão utilizadas são as mesmas). Portanto, as observações aqui traçadas são válidas para todas as políticas.

Percebe-se, nas Figuras 6.12 e 6.13, que o Descoberto e o Santa Maria são os mananciais mais vulneráveis, dado que possuem elevada retirada para atender a demanda de água e vazão afluyente mais baixa. O primeiro reflete o comportamento mais crítico: seu volume disponível sofre quedas significativas (vide os gráficos de “volume disponível” do Descoberto nas Figuras 6.12 e 6.13) e que só não são piores pelo fato de o Corumbá IV passar a operar nos primeiros 5 anos da simulação, conforme constatado na seção anterior. Além disso, observa-se que nos períodos de quedas mais bruscas dos níveis do Descoberto, a demanda suprida por esse manancial é reduzida, ao passo que a do Corumbá IV aumenta consideravelmente (vide “demanda atendida” nas Figuras 6.12 e 6.13). Tais fatos reforçam a grande necessidade do aporte de água fornecido pelo Corumbá IV para fins de atendimento da demanda e de preservação dos níveis do Descoberto. O volume disponível no Santa Maria, por sua vez, apesar de se manter acima de 20% de sua capacidade total, atinge níveis mais baixos à medida que a simulação avança. Desse modo, ainda que a CAESB_TSM tenha apresentado 100% de confiabilidade em todas as políticas, evidencia-se que os níveis de seu

principal manancial apresentam tendência geral de queda ao longo da simulação, o que demonstra que a demanda associada ao Santa Maria exerce pressão contínua sobre esse sistema hídrico. Além disso, verifica-se que os níveis do Santa Maria só não atingem valores mais baixos em razão da expansão do Sistema Paranoá, visto que a demanda atendida por esse último aumenta progressivamente após a execução dos projetos relacionados à ampliação de sua capacidade de produção de água.

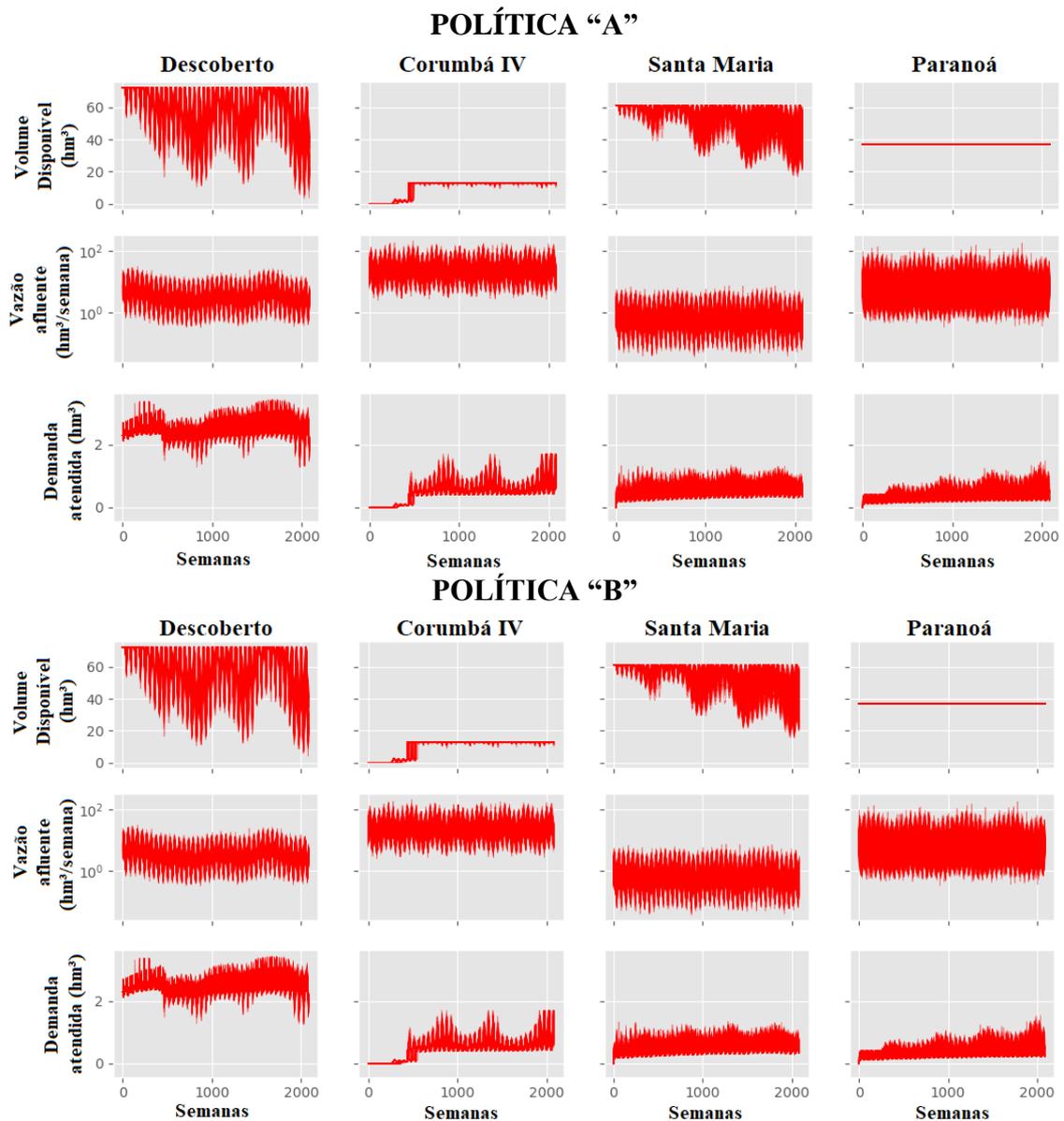


Figura 6.13 – Evolução semanal do volume disponível (hm^3), da vazão afluyente ($\text{hm}^3/\text{semana}$) e da demanda (hm^3) de cada reservatório em 250 cenários simulados (Políticas “A” e “B”).

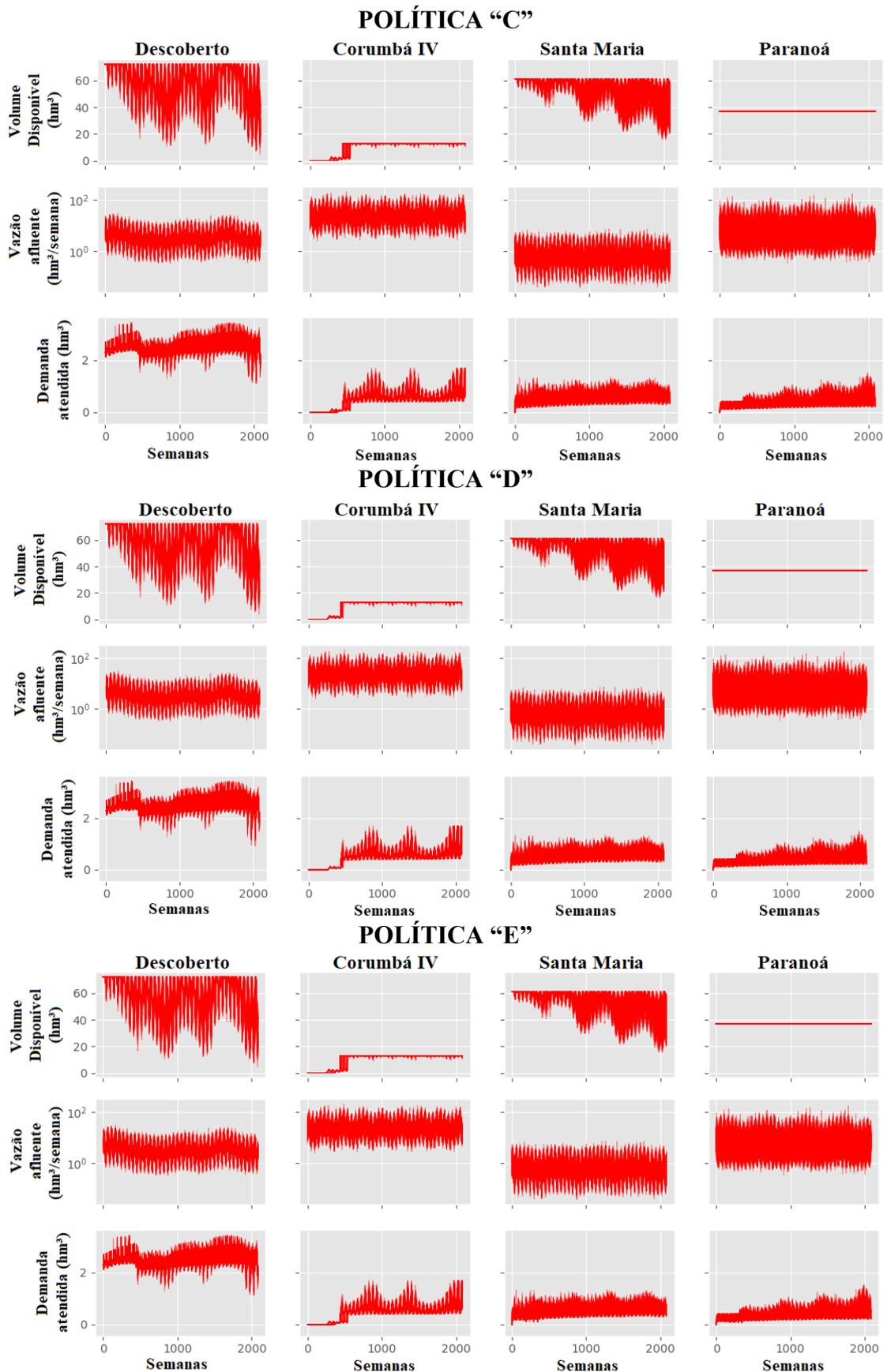


Figura 6.14 - Evolução semanal do volume disponível (hm^3), da vazão afluente ($\text{hm}^3/\text{semana}$) e da demanda (hm^3) de cada reservatório em 250 cenários simulados (Políticas “C”, “D” e “E”).

O comportamento estável dos volumes disponíveis no Corumbá IV e no Paranoá ao longo de todo o horizonte de simulação evidencia que a demanda de abastecimento urbano não interfere em suas disponibilidades hídricas, o que decorre sobretudo do fato de possuírem vazões afluentes significativamente maiores que as dos demais (vide “vazão afluente” nas Figuras 6.12 e 6.13). Tal estabilidade, por sua vez, demonstra-se bastante necessária e oportuna para reforçar os Sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria, respectivamente, e para assegurar a confiabilidade do serviço de abastecimento urbano no DF nos próximos 40 anos. Por fim, cabe destacar que os volumes apresentados nos gráficos do Corumbá IV e do Paranoá correspondem apenas à parcela alocada para abastecimento urbano, conforme detalhado no item 4.1.2.2.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa teve por objetivo contribuir com o aperfeiçoamento do planejamento e da gestão do sistema de abastecimento urbano do Distrito Federal por meio da otimização, sob condições de incertezas profundas, de critérios técnicos e financeiros relacionados ao desempenho dos sistemas hídricos e das companhias de saneamento. Assim como é de fundamental importância que se mantenha a confiabilidade do serviço de abastecimento de água sob níveis elevados, tem-se que a sustentabilidade financeira das companhias de saneamento também deve ser preservada, sobretudo no atual contexto brasileiro de mudanças do marco regulatório, o qual demandará desempenhos ainda mais eficientes por parte das atuais e futuras empresas de saneamento.

Conforme apresentado no item 3.1, incertezas associadas à demanda crescente, às mudanças climáticas, à disponibilidade de recursos financeiros e ao ambiente regulatório impõem grandes desafios à concepção de políticas de abastecimento urbano robustas, que assegurem maior segurança hídrica à população e preservem o equilíbrio financeiro das companhias de saneamento. A metodologia adotada nessa pesquisa para subsidiar a exploração dos portfólios de abastecimento urbano buscou, portanto, integrar elementos-chave dos processos de planejamento, responsáveis por conferir robustez e adaptabilidade às políticas obtidas. Tais elementos, por sua vez, foram explorados com o auxílio do sistema WaterPaths, cuja estrutura de simulações estocásticas e adaptativas possibilitou a otimização dos critérios técnicos e financeiros sob ampla gama de cenários representativos de possíveis estados futuros do mundo. Durante a otimização, ações de mitigação de secas foram estrategicamente integradas aos investimentos em ampliação da infraestrutura de oferta, de modo a subsidiar tomadas de decisão de curto e de longo prazo, respectivamente.

A fim de melhor atender as especificidades do estudo de caso dessa pesquisa, novas funcionalidades foram adicionadas ao sistema WaterPaths, a exemplo da política de transferência mútua de água entre as companhias, da nova condição de falha relacionada à saturação da capacidade de tratamento e da implementação da tarifa de água e esgoto como um fator de incerteza profunda. A inclusão de incertezas profundas nos cenários simulados, por sua vez, possibilita melhor representação da complexidade associada à evolução e operação dos sistemas, sobretudo no contexto de uma perspectiva de longo prazo. Isso favorece a obtenção de políticas mais robustas, que apresentem elevado desempenho sob os

mais distintos e perturbadores estados futuros do mundo, conforme constatado em estudos anteriores (Beh *et al.*, 2015; Haasnoot *et al.*, 2013; Herman *et al.*, 2014; Marchau *et al.*, 2019; Trindade *et al.*, 2017; Trindade *et al.*, 2019; Watson e Kasprzyk, 2017). Desse modo, as políticas de gestão e planejamento do sistema de abastecimento urbano obtidas nessa pesquisa possuem a particularidade de terem sido exploradas sob condições mais diversas.

Ao analisar o desempenho das funções objetivo nas políticas otimizadas, verificou-se que, de modo geral, confiabilidade e frequência de restrição possuem relações conflitantes, tendo em vista que ganhos de confiabilidade na operação dos sistemas hídricos estão associados à implementação mais frequente de restrições de uso da água. Observou-se também que maiores investimentos em obras de infraestrutura tendem a reduzir a necessidade de utilização dos instrumentos de mitigação das secas, visto que tais políticas apresentaram menores custos anuais médios, os quais são mais impactados pela implementação de restrições e transferências. Desse modo, apesar de os investimentos em ampliação da infraestrutura de oferta possuírem maiores custos associados, no longo prazo podem ser menos dispendiosos do que a implementação frequente dos instrumentos de mitigação das secas.

Apesar de a otimização fornecer amplo espectro de soluções não dominadas, constatou-se que muitas delas não são passíveis de serem implementadas na prática e, por isso, critérios mínimos de desempenho foram estabelecidos a determinadas funções objetivo ($CONF \geq 99\%$, $FR \leq 5\%$, $CAM \leq 5\%$ e $CPPP \leq 0,5\%$), o que resultou na permanência de apenas 6 políticas com fundo de contingência e 5 sem fundo de contingência. Ao analisar o comportamento das companhias CAESB_DESC e CAESB_TSM nessas 11 políticas, constatou-se que a primeira apresenta pior desempenho em praticamente todos os objetivos, o que evidencia a maior vulnerabilidade e complexidade dos sistemas produtores que integram tal companhia (Descoberto e Corumbá IV), sobretudo o Descoberto. Observou-se que seus níveis de fato atingem valores muito baixos ao longo do horizonte simulado, inferiores a 20% de sua capacidade total, grande parte em decorrência de sua elevada demanda associada. Por outro lado, o Santa Maria, principal manancial utilizado pela CAESB_TSM, apesar de se manter acima de 20% de sua capacidade total, atinge níveis mais baixos à medida que a simulação avança, indicando que tal sistema hídrico também é pressionado pelo crescimento da demanda.

Com relação ao fundo de contingência, constatou-se que a sua inserção nas políticas de abastecimento urbano (formulação I) não resultou em ganhos de performance significativos na variabilidade das receitas e despesas anuais das companhias (CPPP), visto que determinadas políticas sem fundo de contingência (formulação II) apresentaram perdas financeiras muito próximas de zero e sob custos anuais médios (CAM) mais baixos. Entretanto, alertou-se para a possibilidade de que a variabilidade limitada das séries hidrológicas sintéticas utilizadas nessa pesquisa tenha resultado na subutilização dos instrumentos de mitigação de secas, de modo a reduzir a relevância e a necessidade de se manter fundos de contingência.

Ao analisar as regras de decisão das políticas que atendem aos critérios de desempenho, constatou-se que de fato os instrumentos de mitigação das secas possivelmente teriam sido mais explorados durante a otimização caso a componente climática dos cenários simulados tivesse incorporado condições mais diversificadas. Ainda assim, apesar do uso infrequente de restrições e transferências, constatou-se o papel estratégico dessas medidas na manutenção da confiabilidade dos sistemas hídricos, visto que tais alternativas foram imediatamente utilizadas em momentos cujas condições eram bastante desfavoráveis (baixos níveis dos reservatórios, no caso da CAESB_DESC, e capacidade de tratamento saturada, no caso da CAESB_TSM). Nesse sentido, observou-se que ambas as companhias realizaram transferências de água em todas as políticas, o que corrobora a importância desse instrumento para a gestão dos sistemas Descoberto e Torto/Santa Maria, bem como os benefícios da cooperação mútua entre sistemas interligados. Além disso, observou-se que as transferências foram eficazes em reduzir a necessidade de implementação de restrição de uso da água, cujo acionamento é mais indesejável pelo fato de prejudicar as atividades domésticas, comerciais e industriais da população.

A utilização das alternativas de curto prazo nas políticas otimizadas também possibilitou, em determinados momentos da simulação, a postergação de elevados investimentos em novas infraestruturas, o que pode ser bastante vantajoso sob o ponto de vista do planejamento e da execução financeira das companhias. Tem-se, portanto, que relações estratégicas são estabelecidas entre as medidas de curto e de longo prazo quando exploradas conjuntamente nos portfólios de gestão e planejamento de sistemas hídricos de abastecimento urbano.

Os investimentos realizados em obras de infraestrutura, por sua vez, evidenciaram a necessidade de expansão da capacidade de oferta das companhias nos próximos anos, a fim

de possibilitar que suas demandas futuras sejam atendidas e que os níveis de seus principais reservatórios, Descoberto e Santa Maria, sejam preservados. Observa-se que tais investimentos demonstraram-se não apenas necessários, como também urgentes, visto que, dentro de um horizonte de planejamento de 40 anos, as novas infraestruturas passaram a operar já no quinto ano da simulação (2025). Tal fato inclusive sugere que o serviço de abastecimento de água prestado atualmente já esteja operando próximo à sua capacidade limite, o que constitui uma importante sinalização ao planejamento da companhia de saneamento.

Nesse contexto, os resultados apontam que ao menos dois grandes projetos de infraestrutura serão necessários nos próximos 40 anos: o Sistema Produtor Corumbá, com capacidade de produção de 5.600 l/s, dos quais 2.800 l/s são destinados à CAESB, e o Sistema Produtor Paranoá, com capacidade de produção de 2.100 l/s (configuração máxima do sistema). O primeiro projeto, cujos investimentos previstos são de aproximadamente R\$ 300 milhões, demonstrou-se eficaz em reforçar o sistema Descoberto e em suprir, até o ano de 2059, a demanda das localidades atualmente abastecidas por ele. O segundo projeto, por sua vez, requer investimentos menores, próximos de R\$ 100 milhões, e representa um importante reforço ao sistema integrado Torto/Santa Maria. Apesar disso, observou-se que possivelmente haverá necessidade de se realizar novas expansões da capacidade de produção de água da companhia, visto que, em determinadas simulações, a demanda superou 90% da capacidade de tratamento do sistema e manteve-se assim até o final do horizonte de planejamento. Desse modo, é interessante que se estude a possibilidade de obtenção de maiores outorgas de abastecimento urbano no Paranoá ou a execução de outros projetos que resultem na ampliação da oferta de água do sistema integrado Torto/Santa Maria, Bananal e Paranoá, a fim de garantir, com maior segurança, o atendimento de sua demanda futura.

Quanto às recomendações aos futuros trabalhos, inicialmente sugere-se que procedimentos estocásticos sejam utilizados para gerar as séries temporais hidrológicas que compõem os cenários da simulação, a fim de possibilitar a obtenção de sequências de vazão e de evaporação que extrapolem o comportamento apresentado em seus registros históricos. Geradores sintéticos podem ser ajustados para aumentar a frequência e a severidade de secas sem distorcer a autocorrelação presente nos registros históricos, conforme realizado em Kirsch *et al.* (2013). Ao constituir cenários climáticos alternativos, é possível avaliar, por exemplo, quais seriam as implicações gerais sobre o comportamento dos sistemas hídricos

caso eventos de secas com magnitude semelhante àquela de 2016-2018 se tornassem mais frequentes em razão de mudanças climáticas. Do mesmo modo, cenários do IPCC referentes às mudanças climáticas também podem ser considerados em análises futuras. Tais cenários diversificados forçam a exploração ainda mais intensiva das alternativas de mitigação das secas e dos investimentos em obras de infraestrutura, a fim de que as políticas identificadas desempenhem satisfatoriamente sob tais condições.

Cabe destacar, entretanto, que a variabilidade limitada das séries hidrológicas utilizadas nessa pesquisa possibilitou a constatação de que a demanda, por si só, opera como uma grande forçante do sistema de abastecimento, visto que, logo no período inicial da simulação, houve necessidade de se ampliar a infraestrutura de oferta de água das companhias em virtude da detecção de falhas no sistema (volume disponível inferior a 20% da capacidade total combinada e capacidade de tratamento saturada).

Tendo em vista a relevância da demanda de água sobre a disponibilidade hídrica futura, recomenda-se que as séries sintéticas de demanda sejam refinadas, por exemplo, por meio da implementação de funções decrescentes de perdas na distribuição ao longo do horizonte simulado e pela inclusão de demandas e contribuições de outros sistemas/subsistemas produtores relacionados ao Descoberto e Torto/Santa Maria. Para exemplificar, tem-se que atualmente o Sistema Produtor Sobradinho/Planaltina recebe cerca de 120 l/s do Torto/Santa Maria, o que representa uma demanda importante. O Subsistema Gama, por sua vez, contribui com uma vazão de 100 l/s para o abastecimento do Gama, RA originalmente atendida pelo Descoberto.

Por fim, recomenda-se que sejam realizadas consultas à companhia de saneamento no que tange à definição dos intervalos de variação dos fatores de incerteza profunda para fins de amostragem, dos critérios de desempenho das funções objetivo otimizadas e dos níveis de riscos adotados como limites para a ocorrência de falhas no sistema, tanto em relação ao volume de água disponível quanto em relação à saturação da capacidade de tratamento do sistema, conforme detalhado no item 4.1.2.6. Desse modo, as políticas concebidas para auxiliar o planejamento e a gestão dos sistemas de abastecimento urbano refletirão com maior fidelidade as condições operacionais praticadas pela companhia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADASA. (2016a). “Declara a situação de escassez hídrica nos reservatórios do Descoberto e de Santa Maria”. In: *Resolução ADASA n° 15, de 16 de setembro de 2016*. Brasília, DF, 2p.
- ADASA. (2016b). “Declara o estado de restrição de uso dos recursos hídricos, estabelece o regime de racionamento do serviço de abastecimento de água nas localidades atendidas pelos reservatórios do Descoberto e Santa Maria e dá outras providências”. In: *Resolução ADASA n° 20, de 07 de novembro de 2016*. Brasília, DF, 3p.
- ADASA. (2016c). “Estabelece a Tarifa de Contingência para os serviços públicos de abastecimento de água do Distrito Federal, prestados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB, em virtude de situação crítica de escassez hídrica e dá outras providências”. In: *Resolução ADASA n°17, de outubro de 2016*. Brasília, DF, 6p.
- ADASA. (2016d). “Complementação de informações em relação à Resolução que estabelece critérios para a definição de situação crítica de escassez hídrica e estabelece as ações de contenção para assegurar os usos prioritários da água”. In: *Nota Técnica n° 58/2016-SHR ADASA*. Brasília, DF, 16p.
- ADASA. (2016e). “Complementação de informações em relação à Resolução que estabelece critérios para a definição de situação crítica de escassez hídrica e estabelece as ações de contenção para assegurar os usos prioritários da água”. In: *Nota Técnica n° 61/2016 (ADASA, 2016)*. Brasília, DF, 7p.
- ADASA. (2017a). *Sistema de Abastecimento de Água*. Disponível em: <<http://www.adasa.df.gov.br/area-de-imprensa/noticias/1193-sistema-de-abastecimento-de-agua-2>>. Acesso em: 11 de outubro de 2018.
- ADASA. (2017b). “Suspende a cobrança da Tarifa de Contingência para os serviços públicos de abastecimento de água do Distrito Federal, prestados pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB, em virtude de situação crítica de escassez hídrica e dá outras providências”. In: *Resolução ADASA N° 08, de 15 de maio de 2017*. Brasília, DF, 2p.

- ADASA. (2017c). “Autoriza a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB a acessar os recursos oriundos da Tarifa de Contingência para os serviços públicos de abastecimento de água do Distrito Federal, em virtude de situação crítica de escassez hídrica, para custos de capital adicionais para aumento da capacidade de produção de água e interligação de sistemas e dá outras providências”. In: *Resolução ADASA n° 14, de 11 de julho de 2017*. Brasília, DF, 2p.
- ADASA. (2017d). “Outorga de captação no Ribeirão Bananal”. In: *Despacho n° 1037, de 18 de dezembro de 2017*. Brasília, DF, 5p.
- ADASA. (2018a). *Análise de impactos regulatório (AIR) da alteração da estrutura tarifária dos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário do Distrito Federal*. Brasília/DF, 149p.
- ADASA. (2018b). “Estabelece os níveis altimétricos da água do lago Paranoá, a serem mantidos no ano de 2019, visando assegurar os usos múltiplos dos recursos hídricos”. In: *Resolução ADASA n° 33, de 13 de dezembro de 2018*. Brasília, DF, 4p.
- Adamowski, K. (1971). “Spectral density of a riverflow time series”. In: *Journal of Hydrology*, v.14, 43-52.
- ANA. (2002). *A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília/DF, 68p.
- ANA. (2015). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Encarte especial sobre a crise hídrica*. Brasília/DF.
- ANA. (2017). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília, DF, 177p.
- ANA. (2019a). *Portal Hidroweb – Séries Históricas*. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2019.
- ANA. (2019b). *Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos*. Disponível em: <<http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=5094e51beb90418aab741d9dc56ddeb9>>. Acesso em: 29 de setembro de 2019.

- Alves, C. M. A., Barros, F. V. F. e Mendonça Junior, G. M. (2017). “Desenvolvimento do protótipo do sistema de informação para gerenciamento da alocação de água – SIGA”. In: *VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Pernambuco, Brasil.
- Andreu, J., Capilla, J. e Sanchis, E. (1996). “AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management”. In: *Journal of Hydrology*, v.177, 269-291.
- Aven, T. e Zio, E. (2014). “Foundational Issues in Risk Assessment and Risk Management”. In: *Risk Analysis*, v.34(7), 1164-1172.
- Azevedo, L. G. T., Porto, R. L. L. e Porto, M. (1998). “Sistema de apoio a decisão para o gerenciamento integrado de quantidade e qualidade da água: metodologia e estudo de caso”. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(1), 21-51.
- Azevedo, L. G. T., Gates, T. K., Fontane, D. G., Labadie, J. W. e Porto, R. L. (2000). “Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning”. In: *Journal of water resources planning and management*, 126(2), 85-97.
- Bankes, S. (1993). “Exploratory modeling for policy analysis”. In: *Operations Research*, 41(3), 435-449.
- BCB. (2020). *Calculadora do Cidadão*. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=2>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.
- Beh, E. H. Y., Maier, H. R. e Dandy, G. (2015). “Adaptive, multiobjective optimal sequencing approach for urban water supply augmentation under deep uncertainty”. In: *Water Resources Research*, v.51, 1529-1551.
- Bonzanigo, L., Rozenberg, J., Felter, G. C., Lempert, R. J., e Reed, P. M. (2018). *Building the Resilience of WSS Utilities to Climate Change and Other Threats: A Road Map*. The World Bank, Washington, DC, 79p.
- Borgomeo, E., Farmer, C. L. e Hall J. W. (2015). “Numerical rivers: A synthetic streamflow generator for water resources vulnerability assessments”. In: *Water Resources Research*, v.51, 5382-5405.

- Borgomeo, E., Mortazavi-Naeini, M., Hall, J. W. e Guillod, B. P. (2018). “Risk, Robustness and Water Resources Management under Uncertainty.” In: *Earth’s Future*, 6(3), 468–487.
- Bosomworth, K., Leith, P., Harwood, A., and Wallis, P. J. (2017). “What’s the problem in adaptation pathways planning? The potential of a diagnostic problem structuring approach”. In: *Environmental Science & Policy*, 76:23–28.
- Braga, B., Barbosa, P. S. F. e Nakayama, P. T. (1998). “Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos”. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 3(3), 73-95.
- Brasil. (1997). Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. “Política Nacional de Recursos Hídricos”. Brasília, DF.
- Brasil. (2018). *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2016*. Brasília, SNSA/MCIDADES, 220p.
- Brears, R. C. (2017). *Urban water security*. Singapore: Wiley.
- Brockwell, P. J. e Davis, R. A. (2006). *Time Series: Theory and Methods*, Springer, Nova Iorque, NY.
- Bryant, B. P. e Lempert, R. J. (2010). “Thinking inside the box: A participatory, computer-assisted approach to scenario discovery”. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1), 34–49.
- CAESB. (2003). “Relatório do levantamento batimétrico do Lago Paranoá”. Brasília, DF.
- CAESB. (2018a). “Relatório de informações detalhadas sobre as medidas estratégicas e operacionais adotadas para enfrentamento da crise hídrica no Distrito Federal”. In: *Nota Técnica Conjunta N° 36.162/2018*, Brasília, DF, 80p.
- CAESB. (2018b). *Relatório Anual de Atividades da Caesb*. Brasília, DF, 22p.
- CAESB. (2018c). *Relatório da Administração*. Brasília, DF, 66p.
- CAESB. (2018d). *Relatório de Demonstrações Financeiras da CAESB – Exercício de 2018*. Brasília, DF, 13p.

- CAESB. (2018e). *Histórico: Tarifa de Contingência*. Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/agua/crise-hidrica-historico/tarifa-de-contingencia.html>>. Acesso em: 13 de outubro de 2018.
- CAESB. (2019a). “Atualização de informações e cronograma de obras de implantação da ETA GAMA, Sistema Corumbá e Transferência para o Sistema Sobradinho e projeções dos Reservatórios Descoberto e Santa Maria para o ano de 2019”. In: *Nota Técnica Conjunta N° 15.125/2019*, Brasília, DF, 14p.
- CAESB. (2019b). *Relatório de indicadores de desempenho*. Brasília, DF, 140p.
- CAESB. (2019c). *Estações de Tratamento de Água*. Disponível em: <<http://atlascaesb.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=4d06131962ca482a9d51502c630e195f>>. Acesso em: 09 de outubro de 2019.
- CAESB (2019d). *Estações de Tratamento de Esgoto*. Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/lai/3-portal/esgoto/25-unidades-de-tratamento-de-esgoto.html>>. Acesso em: 14 de maio de 2019.
- CAESB. (2019e). *Relatório da Administração*. Brasília, DF, 85p.
- CAF. (2018). “Garantir a segurança hídrica nas cidades, principal desafio para a América Latina”. Disponível em: <<https://www.caf.com/pt/presente/noticias/2018/03/garantir-a-seguranca-hidrica-nas-cidades-principal-desafio-para-a-america-latina/>>. Acesso em: 15 de outubro de 2018.
- Characklis, G., Kirsch, B., Ramsey, J., Dillard, K. e Kelley, C.T. (2006). “Developing portfolios of water supply transfers”. In: *Water Resources Research*, 42, W05403.
- CODEPLAN. (2012). *Pesquisa Distrital por Amostras de Domicílios – Distrito Federal – PDAD/DF - 2011*. Brasília, DF, 148p.
- CODEPLAN. (2014). *Pesquisa Distrital por Amostras de Domicílios – Distrito Federal – PDAD/DF - 2013*. Brasília, DF, 148p.
- CODEPLAN. (2016). *Pesquisa Distrital por Amostras de Domicílios – Distrito Federal – PDAD/DF - 2015*. Brasília, DF, 151p.

- CODEPLAN. (2019). *PDAD/DF 2018 - Destaques*. Brasília, DF, 4p.
- Correio Braziliense. *Crise hídrica no DF causa prejuízo à agricultura*. Disponível em: <https://www.correiobrasiliense.com.br/app/noticia/cidades/2017/12/06/interna_cidadedf,645774/crise-hidrica-da-prejuizo-de-r-600-milhoes-a-agricultura-do-df.shtml>. Acesso em: 13 de outubro de 2018.
- CTE. (1999). *Estudo de impacto ambiental do aproveitamento múltiplo Corumbá IV*, Goiânia, GO.
- Detzel, D. H. M. (2015). *Modelagem de séries hidrológicas: uma abordagem de múltiplas escalas temporais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos, 218p.
- Distrito Federal. (2011). *Lei Distrital n° 4.671, de 10 de novembro de 2011*. Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação de reservatórios de captação de água para as unidades habitacionais do DF e dá outras providências. Brasília, DF.
- Distrito Federal. (2017). *Decreto n° 37.976, de 24 de janeiro de 2017*. Diário Oficial do Distrito Federal, Brasília, DF. Disponível em: <http://www.buriti.df.gov.br/ftp/diariooficial/2017/01_Janeiro/DODF%20018%2025-01-2017/DODF%20018%2025-01-2017%20INTEGRA.pdf>. Acesso em: 19 de setembro de 2018.
- Estevan, A. (1999). *Gestión de la demanda de agua y su impacto económico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Politécnica de Valência, Espanha.
- Fertis, A., Baes, M. e Lüthi, H. (2012). “Robust risk management”. In: *European Journal Of Operational Research*, 222(3), 663-672.
- Fleming, S. W., Weber, F. A. (2012). “Detection of long-term change in hydroelectric reservoir inflows: bridging theory and practice”. In: *Journal of Hydrology*, 470-471, 36-54.
- FUNCEME. (2018). *Manual do SIGA*, v.1, Fortaleza, Brasil, 168p.
- GDF. (2012). *Plano Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Distrito Federal (PGIRH/DF)*. Brasília, DF.

- GDF. (2017a). *Plano integrado de enfrentamento à crise hídrica*. Brasília, DF, 91p.
- GDF. (2017b). *Plano Distrital de Saneamento Básico*. Brasília, DF, 484p.
- Gleick, P. H. (2002). Soft water paths. In: *Nature*, 418:373.
- Groves, D. G., Bloom, E., Lempert, R. J., Fischbach, J. R., Nevills, J. e Goshi, B. (2015). “Developing key indicators for adaptive water planning”. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(7):05014008.
- Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E. e ter Maat, J. (2013). “Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world”. In: *Global Environmental Change*, 23(2), 485–498.
- Hadka, D. (2015). MOEA Framework - A Free and Open Source Java Framework for Multiobjective Optimization. Version 2.13, <http://www.moeaframework.org/>.
- Hadka, D. e Reed, P. (2013). “Borg: An Auto-Adaptive Many-Objective Evolutionary Computing Framework”. In: *Evolutionary Computation*, 21(2), 231–259.
- Hadka, D. e Reed, P. (2014). “Large-scale Parallelization of the Borg Multiobjective Evolutionary Algorithm to Enhance the Management of Complex Environmental Systems”. In: *Environmental Modelling and Software*.
- Hadka, D., Reed, P. e Simpson, T. (2012). “Diagnostic Assessment of the Borg MOEA for Many-Objective Product Family Design Problems”. In: *WCCI 2012 World Congress on Computational Intelligence, Congress on Evolutionary Computation*, Brisbane, Australia, 986–995.
- Hall, J. W., Mortazavi-Naeini, M., Borgomeo, E., Baker, B., Gavin, H., Gough, M., Harou, J. J., Hunt, D., Lambert, C., Piper, B., Richardson, N., e Watts, G. (2019). “Risk-based water resources planning in practice: a blueprint for the water industry in England”. In: *Water and Environment Journal*.
- Harvey, A. C. (1989). *Forecasting Structural Time Series models and the kalman filter*, Cambridge University Press.
- Herman, J. D., Zeff, H. B., Reed, P. M., e Characklis, G. W. (2014). “Beyond optimality:

- Multistakeholder robustness tradeoffs for regional water portfolio planning under deep uncertainty.” In: *Water Resources Research*, 50(10), 7692–7713.
- Herman, J. D., Zeff, H. B., Lamontagne, J. R., Reed, P. M. e Characklis, G. W. (2016). “Synthetic drought scenario generation to support bottom-up water supply vulnerability assessments”. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(11), 04016050.
- IBGE. (2011). *Sinopse do censo demográfico 2010*. Rio de Janeiro, 261p.
- IBGE. (2018). *Projeções da população: Brasil e unidades da federação: revisão 2018*. IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, 58p.
- IBGE. (2020). *Distrito Federal: População*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/df/panorama>>. Acesso em: 02 de junho de 2020.
- Jamieson, D. G. e Fedra, K. (1996). “The ‘waterware’ decision-support system for river-basin planning”. In: *Journal of Hydrology*. v.177, 163-175.
- Jha, M. K. e Gupta, A. D. (2003). “Application of Mike Basin for water management strategies in a watershed”. In: *Water International*, v.28(1), 27-35.
- Kasprzyk, J. R. e Reed, P. (2009) “Managing population and drought risks using manyobjective water portfolio planning under uncertainty”. In: *Water Resources Research*, 45, W12401.
- Kasprzyk, J. R., Nataraj, S., Reed, P. M. e Lempert, R. J. (2013). “Many Objective Robust Decision Making for Complex Environmental Systems Undergoing Change”. In: *Environmental Modelling and Software*, 42, 55–71.
- Kirsch, B. R., Characklis, G. W. e Zeff, H. B. (2013). “Evaluating the Impact of Alternative Hydro-Climate Scenarios on Transfer Agreements: A Practical Improvement for Generating Synthetic Streamflows”. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(4), 396–406.
- Klijn, F., Van Buuren, M., Van Rooij, S.A.M. (2004). “Flood-risk Management Strategies for an Uncertain Future: Living with Rhine River Floods in The Netherlands?”. In: *A Journal of the Human Environment*, 33(3), 141-147.

- Knight, F. H. (1921). *Risk, uncertainty and profit*. Hart, Schaffner and Marx, Houghton Mifflin, 1921.
- Kwakkel, J. H., Haasnoot, M., e Walker, W. E. (2014). “Developing dynamic adaptive policy pathways: a computer-assisted approach for developing adaptive strategies for a deeply uncertain world”. In: *Climatic Change*, v.132(3):373–386.
- Kwakkel, J. H., Auping, W. L., e Pruyt, E. (2013). “Dynamic scenario discovery under deep uncertainty: the future of copper”. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 80(4):789-800.
- Kwakkel, J. H., Haasnoot, M. e Walker, W. E. (2016). “Comparing robust decision-making and dynamic adaptive policy pathways for model-based decision support under deep uncertainty”. In: *Environmental Modelling & Software*, 86, 168–183.
- Lamontagne, J. R. e Stedinger, J. R. (2018). “Generating synthetic streamflow forecasts with specified precision”. In: *Water Resources Planning and Management*, 144(4), 04018007.
- Laumanns, M., Thiele, L., Deb, K., e Zitzler, E. (2002). “Combining convergence and diversity in evolutionary multiobjective optimization”. In: *Evolutionary Computation*, 10(3):263–282.
- Lawrance, A. J., Kottegoda, N. T. (1977). “Stochastic modelling of riverflow time series”. In: *Journal of the Royal Statistical Society*, v.140(1), 1-47.
- Lawton, L. (2009). “An exercise for illustrating the logic of hypothesis testing”. In: *Journal of Statistics Education*, v.17(2).
- Lempert, R. J. (2002). “A new decision sciences for complex systems”. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(Supplement 3), 7309–7313.
- Lempert, R. J., Popper, S. W. e Bankes, S. C. (2003). “Robust Decision Making”. In: *Shaping the next one hundred years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis*. RAND Corporation, Santa Monica, California, 39-68.

- Loucks, D. P. (1995). “Developing and implementing decision support systems: a critique and a challenge”. In: *Water Resources Bulletin*, 31(4), 571-582.
- Marchau, V. A. W. J., Walker, W. E., Bloemen, P. J. T. M. e Popper, S. W. (2019). *Decision Making Under Deep Uncertainty*, Springer International Publishing, Cham, pp 1-20.
- Matrosov, E. S., Harou, J. J., Loucks, D. P. (2011). “A computationally efficient open-source water resource system simulator-application to London and the Thames Basin”. In: *Environmental Modelling & Software*, v.26, 1599-1610.
- Mckay, M. D., Beckman, R. J. e Conover, W. J. (1979). “A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code”. In: *Technometrics*, v. 21(2), 239-245.
- McNabb, D. E. (2019). “The population growth barrier.” In: *Global Pathways to Water Sustainability*, 67–81.
- Melo, M. C. (2016). *Segurança hídrica para abastecimento urbano: proposta de um modelo analítico e aplicação na bacia do rio das Velhas, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (COPPE), 495p.
- Moody’s. (2017). “Rating methodology: Us municipal utility revenue debt”. Relatório Técnico, Moody’s.
- Mozenter, Z. D., Yates, A. J., Schnier, K. E., Hughes, J. A., e Characklis, G. W. (2018). “Understanding water utility attitudes toward water transfers and risk: Pretest results”. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.144(4):06018002.
- Mysiak, J., Giupponi, C. e Rosato, P. (2005). “Towards the development of a decision support system for water resource management”. In: *Environmental Modelling & Software*, 20(2), 203-214.
- Nair, S. e Howlett, M. (2017). “Policy myopia as a source of policy failure: adaptation and policy learning under deep uncertainty”. In: *Policy & Politics*, v.45(1):103–118.
- Nascimento, F. A. B. (2016). *Uso do sistema de apoio ao gerenciamento de recursos hídricos para análise da segurança hídrica na Bacia do Rio Mundaú (AL/PE)*.

Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, 108p.

Nicolosi, V., Cancelliere, A. e Rossi, G. (2009). “Reducing risk of shortages due to drought in water supply systems using genetic algorithms”. In: *Irrigation and Drainage*, 58(2), 171-188.

Ono, S. (2008). *Sistema de suporte a decisão para gestão de água urbana - URBSSD*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 148p.

OCDE. (2013). *Water security for better lives: a summary for policymakers*. 16p.

Palmer, R. N. e Characklis, G. W. (2009). “Reducing the costs of meeting regional water demand through risk-based transfer agreements”. In: *Journal of Environmental Management*, v.90, 1703-1714.

Reed, P. M., Hadka, D. M., Herman, J. D., Kasprzyk, J. R. e Kollat, J. B. (2013). “Evolutionary multiobjective optimization in water resources: the past, present, and future”. In: *Water Resources*, v.51, 438-456.

Rego, M. F. (2013). *Algoritmos multiobjetivos para o problema de sequenciamento de tarefas em uma máquina com tempo de preparação dependente da sequência e da família*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 76p.

Roberto, A. N., Porto, R. L. L., Schardong, A. e Neto, H. L. (2007). “O novo sistema de suporte a decisões ACQUANET”. In: *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo, 20p.

Rocha, E. R. L., César, M. C. M. (2015). “Balanço hídrico do reservatório do rio Descoberto”. In: *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, 8p.

Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Blake, R., Bowman, M., Faris, C., Gornitz, V., Horton, R., Jacob, K., LeBlanc, A., Leichenko, R., Linkin, M., Major, D., O’Grady, M., Patrick, L., Sussman, E., Yohe, G. e Zimmerman, R. (2011). “Developing coastal adaptation to climate change in the New York City infrastructure-shed: process, approach, tools and strategies”. In: *Climatic Change*, v.106, 93-127.

- Schardong, A. (2011). *Aplicação de algoritmos evolucionários à gestão integrada de sistemas de recursos hídricos*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 185p.
- Scruton, R. (2013). “The Uses of Pessimism: And the Danger of False Hope”. OXFORD UNIV PR.
- Shafer, K. e Fox, R. (2017). *An equitable water future, a national briefing paper*. US Water Alliance, 64p.
- Sieber, J. e Purkey, D. (2015). *WEAP: Water Evaluation And Planning System. User Guide for WEAP*. Stockholm Environment Institute, U.S. Center, Somerville, MA, 400p.
- Simonovic, S. P. (2009). *Managing Water Resources: methods and tools for a system approach*. UNESCO, Londres, 640p.
- Srinivas, N., Deb, K. (1994). “Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms”. In: *Journal of Evolutionary Computation*, v.2(3), 221-248.
- Srinivasan, V., Konar, M. e Sivapalan, M. (2017). “A Dynamic framework for water security”. In: *Water Security*, v.1, 12-20.
- Stedinger, J. R. e Taylor, M. R. (1982). “Synthetic streamflow generation: 1. Model verification and validation”. In: *Water Resources Research*, 18(4), 909–918.
- TJCOG. Triangle J Council of Governments. (2014). *Triangle Regional Water Supply Plan*. Relatório Técnico, Jordan Lake Partnership.
- Trindade, B.C., Reed, P. M., Herman, J. D., Zeff. H. B. e Characklis, G. W. (2017). “Reducing regional drought vulnerabilities and multi-city robustness conflicts using many-objective optimization under deep uncertainty”. In: *Advances In Water Resources*, v.104, 195-209.
- Trindade, B., Reed, P., Zeff., H. B. e Characklis, G. (2018). “WaterPaths: a new open source stochastic urban water portfolio planning framework”.

- Trindade, B. C. (2019). *Advancing regional water supply portfolio management and cooperative infrastructure investment pathways under deep uncertainty*, Tese de Doutorado, Environmental and Water Resources Systems Program of Cornell University, 273p.
- Trindade, B. C., Gold, D. F., Reed, P. M., Zeff, H. B., Characklis, G. W. (2020). “Water pathways: an open source stochastic simulation system for integrated water supply portfolio management and infrastructure investment planning”. In: *Environmental Modelling and Software*, v.132, 104772.
- Trindade, B. C., Reed, P. M. e Characklis, G. W. (2019). “Deeply uncertain pathways: Integrated multi-city regional water supply infrastructure investment and portfolio management”. In: *Advances in Water Resources*, v.134, 103442.
- UNESCO. (2013). *Water Security & the Global Water Agenda: a UN-Water analytical brief*. United Nations University Institute for Water, Environment & Health, Canadá.
- Viana, F. A. C. (2015). “A tutorial on Latin Hypercube design of experiments”. In: *Quality and Reliability Engineering International*, 32(5), 1975-1985.
- Walker, W. E., Rahman, S. e Cave, J. (2001). “Adaptive policies, policy analysis, and policy-making”. In: *European Journal of Operational Research*, 128(2), 282–289.
- Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M. B. A. e Janssen, P. (2003). “Defining uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in modelbased decision support”. In: *Integrated Assessment*, 4(1), 5–17.
- Walker, W. E., Lempert, R. J. e Kwakkel, J. H. (2013). “Deep uncertainty, entry”. In: S. I. Gass e M. C. Fu (eds.) *Encyclopedia of operations research and management science*, Springer, Nova Iorque.
- Walker, W. E., Lempert, R. J. e Kwakkel, J. H. (2013). “Deep uncertainty, entry”. In: S. I. Gass e M. C. Fu (eds.) *Encyclopedia of operations research and management science*, Springer, Nova Iorque.

- Watson, A. A. e Kasprzyk, J. R. (2017). “Incorporating Deeply Uncertain Factors into the Many Objective Search Process”. In: *Environmental Modelling and Software*, 159-171.
- Yoe, C. E. (2019). “The Basics”. In: *Principles of risk analysis: decision making under deep uncertainty*, 2a Ed., Taylor & Francis Group, Boca Raton, 1-21.
- Zagona, E.A., Fulp, T.J., Shane, R., Magee, T., Goranflo, H.M., 2001. “Riverware: a generalized tool for complex reservoir system modeling”. In: *Journal of the American Water Resources Associations*, v.37(4), 913-929.
- Zeff, H. B. e Characklis, G. W. (2013). “Managing water utility financial risks through third-party index insurance contracts”. In: *Water Resources Research*, 49(8), 4939–4951
- Zeff, H. B., Kasprzyk, J. R., Herman, J. D., Reed, P. M., e Characklis, G. W. (2014). “Navigating financial and supply reliability tradeoffs in regional drought management portfolios”. In: *Water Resources Research*, 50, 4906-4923.
- Zeff, H. B., Herman, J. D., Reed, P. M. e Characklis, G. W. (2016). “Cooperative drought adaptation: integrating infrastructure development, conservation, and water transfers into adaptive policy pathways”. In: *Water Resources Research*, 52(9), 7327–7346.
- Zitzler, E., Thiele, L., Laumanns, M., Fonseca, C. M. e da Fonseca, V. G. (2003). “Performance assessment of multiobjective optimizers: na analysis and review”. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(2), 117-132.

APÊNDICES

A. ESTRUTURA TARIFÁRIA DA CAESB (ABASTECIMENTO DE ÁGUA)

Tabela A.1 - Estrutura Tarifária da CAESB (Abastecimento de Água).

		TABELA DE TARIFA - VIGÊNCIA DE 01/06/2019 À 31/05/2020				
		TARIFA MENSAL				
RESIDENCIAL NORMAL						
Faixa m3		Vol. Faixa	Alíquota (R\$) Preço p/ m3	Fator de Correção(R\$)	Da Faixa (R\$)	Acumulado (R\$)
1	0a 10	10	3,14	0,00	31,40	31,40
2	11 a 15	5	5,83	26,90	29,15	60,55
3	16 a 25	10	7,45	51,20	74,50	135,05
4	26 a 35	10	12,04	165,95	120,40	255,45
5	36 a 50	15	13,28	209,35	199,20	454,65
6	>50		14,55	272,85		-
RESIDENCIAL POPULAR						
Faixa m3		Vol. Faixa	Alíquota (R\$) Preço p/ m3	Fator de Correção(R\$)	Da Faixa (R\$)	Acumulado (R\$)
1	0a 10	10	2,35	0,00	23,50	23,50
2	11 a 15	5	4,40	20,50	22,00	45,50
3	16 a 25	10	5,76	40,90	57,60	103,10
4	26 a 35	10	11,01	172,15	110,10	213,20
5	36 a 50	15	13,28	251,60	199,20	412,40
6	>50		14,55	315,10		-
TARIFA IRRIGAÇÃO						
Faixa m3		Vol. Faixa	Alíquota (R\$) Preço p/ m3	Fator de Correção(R\$)	Da Faixa (R\$)	Acumulado (R\$)
1	0 a 10	10	17,04	0,00	170,40	170,40
2	> 10		26,70	96,60		
COMERCIAL E PÚBLICA						
Faixa m3		Vol. Faixa	Alíquota (R\$) Preço p/ m3	Fator de Correção(R\$)	Da Faixa (R\$)	Acumulado (R\$)
1	0a 10	10	7,97	0,00	79,70	79,70
2	>10		13,18	52,10		-
INDUSTRIAL						
Faixa m3		Vol. Faixa	Alíquota (R\$) Preço p/ m3	Fator de Correção(R\$)	Da Faixa (R\$)	Acumulado (R\$)
1	0a 10	10	7,97	0,00	79,70	79,70
2	>10	5	12,02	40,50		-
Observações: REAJUSTE REAJUSTE DEFINIDO PELA RESOLUÇÃO SEI-GDF N° 06, DE 29 DE ABRIL DE 2019.						ÍNDICE 3,45%

B. CONSUMO PER CAPITA MÉDIO DAS REGIÕES ADMINISTRATIVAS DO DISTRITO FEDERAL

Tabela B.1 - Consumo per capita médio (l/hab.dia) das regiões administrativas do Distrito Federal. Fonte: PDSB (GDF, 2017b).

RA	2013						2014											
	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Brasília	269,4	296,5	323,9	313,8	284,1	259,5	254,5	313,0	275,0	266,0	269,5	276,0	272,6	282,8	291,5	273,7	284,2	236,8
Cruzeiro	190,5	198,3	221,5	222,8	206,3	190,9	194,6	220,3	199,8	201,5	204,7	220,6	215,8	186,9	203,3	155,4	165,7	138,0
Candangolândia	146,0	158,5	172,7	167,5	163,6	148,4	160,1	170,0	154,0	153,5	148,8	148,7	149,6	148,5	156,3	161,4	158,5	139,9
Sudoeste/Octogonal	189,4	196,8	225,8	217,2	190,9	188,2	183,7	212,5	193,3	190,1	198,4	190,6	207,1	190,9	202,7	174,7	175,6	155,7
Lago Sul	452,7	489,0	550,1	457,3	442,6	378,7	386,6	472,7	385,4	388,6	423,1	433,9	450,3	486,1	482,8	493,6	415,3	392,2
Varjão	120,9	134,6	137,9	144,2	128,5	129,7	138,7	142,8	133,2	126,7	129,3	124,4	126,6	123,0	137,8	133,5	145,9	118,4
Park Way	270,8	294,8	267,7	274,3	271,1	239,1	243,0	284,0	234,5	235,8	251,2	257,8	270,6	285,0	288,0	288,2	246,3	230,7
Lago Norte	262,6	293,1	313,2	279,3	281,9	224,7	257,4	281,4	247,0	253,0	243,7	256,2	276,7	274,6	299,0	293,1	255,8	224,8
Núcleo Bandeirante	168,0	175,5	191,0	188,6	179,6	174,6	171,8	198,4	175,4	169,2	172,4	168,9	171,9	177,7	182,8	168,4	176,0	158,0
Guará	158,8	169,5	184,5	182,4	175,2	158,6	164,3	181,3	166,1	159,1	162,0	163,4	169,4	164,5	170,5	158,6	160,1	143,7
Riacho Fundo	138,7	149,5	161,4	157,4	147,0	143,0	148,5	161,8	147,8	144,3	144,2	142,2	147,9	145,9	158,0	149,1	154,0	133,4
Estrutural/SCIA	158,7	166,3	183,9	181,2	172,7	166,4	168,2	197,7	187,4	181,8	177,2	176,7	175,5	174,1	178,3	185,4	189,5	170,4
Águas Claras	180,6	193,9	212,4	205,3	183,9	182,8	177,4	213,1	189,5	182,4	191,4	185,8	194,7	192,3	198,4	154,7	162,8	143,2
SIA	517,1	565,9	642,7	623,4	543,0	499,7	476,9	571,3	483,2	459,1	415,9	429,8	450,4	480,2	490,4	496,4	490,5	421,6
Vicente Pires	175,6	195,3	216,0	198,2	185,3	164,6	175,9	203,1	170,5	162,4	171,6	174,4	187,2	199,6	197,6	202,3	186,6	165,8
Taguatinga	169,6	181,2	197,6	196,1	180,3	175,2	175,9	197,0	177,3	169,1	174,1	172,9	171,8	175,1	180,2	163,7	164,8	146,5
Ceilândia	129,2	134,0	145,1	140,8	133,6	130,6	134,1	148,8	131,9	128,2	128,7	128,8	129,6	129,9	134,0	137,1	139,7	125,6
Samambaia	127,9	134,4	145,8	141,4	137,8	128,7	133,4	146,2	133,3	131,6	130,8	129,9	132,6	131,0	137,3	136,4	137,7	122,5
Paranoá	134,6	141,4	154,7	149,6	145,0	141,8	146,3	162,5	143,3	142,1	145,1	143,5	145,5	143,1	146,3	148,9	153,9	137,3
Jardim Botânico	216,4	252,8	287,2	240,9	215,1	180,9	201,2	228,0	198,5	185,4	202,4	221,3	240,5	242,3	253,3	250,8	226,3	173,3
Itapoã	110,5	116,3	125,6	125,2	117,5	114,9	119,8	130,5	119,3	116,5	117,7	116,5	117,6	115,7	119,6	127,8	128,1	114,9
Gama	146,6	153,6	169,5	166,6	156,3	150,0	155,4	169,3	155,8	150,8	151,3	152,0	151,5	149,8	157,7	153,1	157,9	136,6
Santa Maria	137,5	143,4	155,8	152,6	145,9	138,5	145,6	159,3	144,3	139,6	139,4	139,6	140,9	140,6	146,6	149,0	148,6	132,6
Recanto das Emas	129,3	134,9	146,3	146,9	138,5	132,1	137,0	150,6	135,8	132,3	132,0	133,0	134,6	134,3	140,2	143,0	145,2	128,8
Riacho Fundo II	125,7	134,5	140,2	140,2	128,9	123,4	130,0	131,3	120,3	117,4	116,5	116,9	119,3	117,7	122,4	126,6	133,4	115,6

RA	2015												2016					
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Brasília	233,5	275,0	224,5	240,0	240,0	249,7	246,2	244,6	272,8	259,0	269,2	237,1	230,5	235,5	231,7	249,6	253,2	258,5
Cruzeiro	149,6	156,2	136,5	143,2	138,6	137,2	147,9	133,4	147,0	151,6	153,2	140,7	146,4	137,3	136,2	151,3	143,6	148,1
Candangolândia	154,9	168,1	131,5	148,1	139,6	152,0	143,0	138,4	154,6	149,1	146,8	142,1	145,7	150,9	139,7	148,7	142,2	148,4
Sudoeste/Octogonal	155,6	172,8	146,6	162,0	154,7	162,4	163,1	150,5	176,2	161,3	166,7	151,4	150,3	157,3	153,0	158,8	159,3	167,9
Lago Sul	402,6	481,5	359,7	389,7	368,3	438,9	464,6	484,2	475,1	461,8	399,1	408,7	358,6	418,1	403,6	452,9	441,8	462,4
Varjão	133,3	156,6	113,5	124,5	124,0	143,8	125,5	120,6	142,7	133,4	138,9	126,6	128,5	138,4	123,0	130,4	132,4	130,6
Park Way	242,5	274,9	205,3	226,1	219,4	270,0	257,0	275,2	295,7	279,1	237,1	235,2	214,8	253,4	235,9	270,7	243,9	268,6
Lago Norte	244,8	269,8	202,3	216,8	211,9	251,4	243,4	254,8	281,2	261,8	232,1	229,0	226,1	232,8	220,4	249,3	234,5	254,6
Núcleo Bandeirante	160,8	179,5	151,6	158,7	154,3	162,5	155,4	152,0	169,7	159,7	164,8	155,4	158,0	165,6	153,3	161,4	159,5	164,6
Guará	152,6	167,5	136,0	149,2	141,9	152,3	145,5	141,9	156,7	153,2	155,3	145,1	144,4	152,2	143,7	150,5	146,6	149,4
Riacho Fundo	144,3	160,5	132,7	137,4	135,1	143,0	140,6	133,5	148,7	145,6	150,7	137,7	141,7	146,0	134,7	143,1	139,7	144,4
Estrutural/SCIA	179,8	199,3	170,8	177,5	166,5	176,7	158,3	151,8	166,6	163,6	161,9	152,3	161,0	163,1	152,9	161,0	161,3	165,0
Águas Claras	147,1	170,8	142,9	148,7	146,1	157,6	148,0	145,4	162,7	154,6	160,1	143,6	144,5	150,2	142,8	151,5	152,6	154,5
SIA	429,3	534,9	391,1	432,5	411,2	430,6	465,6	427,1	495,1	459,1	472,7	411,1	502,4	519,6	406,5	415,0	385,8	417,6
Vicente Pires	180,3	201,6	154,3	162,6	157,9	184,6	176,8	180,8	204,4	191,3	186,6	173,5	164,1	179,4	167,9	181,9	183,6	188,5
Taguatinga	155,1	175,1	142,3	148,8	143,0	159,7	150,7	149,1	168,0	158,1	163,8	150,9	152,4	157,0	147,5	156,8	152,7	159,3
Ceilândia	132,6	147,4	122,3	129,1	125,3	139,5	130,4	128,8	139,6	134,7	137,5	130,5	132,8	134,6	127,7	135,1	134,7	136,7
Samambaia	131,9	146,9	118,7	126,6	122,7	134,4	126,8	125,3	137,6	133,7	136,2	128,6	130,3	133,9	126,6	133,7	131,7	135,0
Paranoá	142,3	154,3	130,1	137,5	134,8	140,9	138,1	134,4	157,1	143,4	147,2	135,8	138,9	140,3	132,6	142,3	140,5	145,1
Jardim Botânico	200,4	234,9	169,1	178,9	180,6	204,6	210,2	215,0	261,3	243,2	224,8	188,2	197,5	187,2	190,9	210,8	220,9	243,3
Itapoã	123,3	133,3	110,9	116,4	113,8	121,5	119,0	115,7	128,8	124,1	127,9	117,5	123,0	126,4	118,8	124,7	123,4	125,0
Gama	146,8	162,7	131,6	139,5	135,9	145,4	138,8	137,9	152,0	149,3	148,0	136,6	140,2	145,3	136,0	148,8	144,9	149,1
Santa Maria	142,1	156,8	127,9	135,8	131,4	142,1	134,9	124,1	137,6	133,5	133,5	126,4	127,9	131,1	122,8	130,9	136,6	140,3
Recanto das Emas	140,6	156,3	123,5	135,5	127,7	138,8	132,8	132,7	142,7	138,9	140,5	133,3	139,7	139,9	132,6	139,7	132,7	136,5
Riacho Fundo II	128,2	140,1	113,5	123,6	115,7	129,2	121,3	112,8	129,6	124,2	124,8	115,6	114,4	126,4	116,3	123,2	119,5	123,6

C. RELAÇÃO ÁREA X VOLUME DOS RESERVATÓRIOS

Tabela C.1 - Relação Área x Volume dos reservatórios.

Reservatório	Área (hm²)	Volume (hm³)	Fonte
Descoberto	412,9	0,0	Nota Técnica n° 58/2016 da ADASA (ADASA, 2016d)
	494,2	4,5	
	584,1	9,9	
	670,8	16,2	
	740,3	23,3	
	825,3	31,1	
	917,1	39,8	
	1023,5	49,5	
	1141,2	60,3	
	1255,3	72,3	
Santa Maria	365,6	0,0	Nota Técnica n° 61/2016 da ADASA (ADASA, 2016e)
	399,3	3,8	
	431,3	8,0	
	462,7	12,4	
	498,0	17,2	
	534,4	22,4	
	569,4	27,9	
	607,7	33,8	
	645,7	40,1	
	687,9	46,7	
	729,0	53,8	
765,1	61,3		
Lago Paranoá	0,0	0,0	Levantamento batimétrico do Lago Paranoá (CAESB, 2003)
	2,8	0,0	
	15,2	0,3	
	81,7	1,6	
	324,8	8,0	
	763,8	26,2	
	1321,3	62,3	
	1874,7	118,5	
	2429,8	193,7	
	3006,9	288,8	
3881,5	460,5		
Corumbá IV	0	0	Portal SNIRH (ANA, 2019b)
	13712	2936,6	
	17330	3708	

D. VAZÕES REMANESCENTES DOS SISTEMAS HÍDRICOS DE ABASTECIMENTO

Tabela D.1 - Vazões remanescentes dos sistemas hídricos de abastecimento.

Infraestrutura Hídrica	Vazões remanescentes (l/s)	Período	Fonte
Reservatório do Descoberto	600	Anual	Rocha e César (2015)
Represa de Santa Maria	0	-	-
Lago Paranoá	700	Período de estiagem	Resolução ADASA n° 33/2018 (ADASA, 2018b)
	1200	Período chuvoso	
Reservatório de Corumbá IV	5300	Anual	CTE (1999)
Ribeirão Bananal	422	Janeiro	Ato de outorga de captação no Ribeirão Bananal (ADASA, 2017d)
	446	Fevereiro	
	474	Março	
	464	Abril	
	406	Maio	
	358	Junho	
	322	Julho	
	286	Agosto	
	258	Setembro	
	258	Outubro	
	314	Novembro	
	372	Dezembro	
Ribeirão do Torto	410	Janeiro	PGIRH/DF (GDF, 2012)
	560	Fevereiro	
	450	Março	
	410	Abril	
	260	Maio	
	140	Junho	
	110	Julho	
	90	Agosto	
	80	Setembro	
	100	Outubro	
	170	Novembro	
	310	Dezembro	

E. PROJEÇÃO POPULACIONAL URBANA (2018 A 2059) POR UNIDADE DE PLANEJAMENTO TERRITORIAL (UPT) DO DISTRITO FEDERAL

Tabela E.1 - Projeção populacional urbana (2018 a 2059) por UPT/DF.

Ano	UPT/DF							População Urbana Total
	Central	Adjacente I	Adjacente II	Oeste	Norte	Leste	Sul	
2018	322.664	92.170	463.775	925.024	331.726	269.446	477.049	2.881.854
2019	336.653	99.171	441.775	977.309	358.692	241.121	467.767	2.922.487
2020	341.262	100.528	447.823	990.688	363.602	244.422	474.171	2.962.496
2021	345.796	101.864	453.772	1.003.850	368.433	247.669	480.470	3.001.854
2022	350.247	103.175	459.613	1.016.772	373.176	250.858	486.655	3.040.496
2023	354.606	104.459	465.333	1.029.427	377.820	253.980	492.712	3.078.337
2024	358.866	105.714	470.924	1.041.793	382.359	257.031	498.631	3.115.318
2025	363.022	106.938	476.377	1.053.858	386.787	260.007	504.405	3.151.394
2026	367.070	108.131	481.690	1.065.611	391.101	262.907	510.031	3.186.540
2027	371.008	109.291	486.857	1.077.041	395.296	265.727	515.502	3.220.721
2028	374.829	110.416	491.871	1.088.134	399.367	268.464	520.811	3.253.892
2029	378.531	111.507	496.729	1.098.882	403.312	271.116	525.955	3.286.032
2030	382.113	112.562	501.430	1.109.280	407.128	273.681	530.932	3.317.126
2031	385.580	113.584	505.980	1.119.346	410.823	276.165	535.750	3.347.227
2032	388.938	114.573	510.386	1.129.094	414.400	278.569	540.415	3.376.375
2033	392.184	115.529	514.645	1.138.516	417.858	280.894	544.925	3.404.552
2034	395.317	116.452	518.756	1.147.610	421.196	283.138	549.278	3.431.747
2035	398.334	117.340	522.715	1.156.369	424.411	285.299	553.470	3.457.937
2036	401.230	118.194	526.516	1.164.776	427.496	287.373	557.494	3.483.077
2037	404.000	119.010	530.151	1.172.818	430.448	289.357	561.343	3.507.125
2038	406.642	119.788	533.618	1.180.489	433.263	291.250	565.015	3.530.065
2039	409.156	120.529	536.918	1.187.787	435.942	293.050	568.508	3.551.889
2040	411.540	121.231	540.045	1.194.707	438.482	294.758	571.820	3.572.582
2041	413.789	121.893	542.997	1.201.237	440.878	296.369	574.945	3.592.108
2042	415.903	122.516	545.771	1.207.372	443.130	297.882	577.882	3.610.455
2043	417.883	123.099	548.369	1.213.120	445.240	299.301	580.633	3.627.644
2044	419.731	123.644	550.794	1.218.486	447.209	300.624	583.201	3.643.688
2045	421.448	124.149	553.047	1.223.469	449.038	301.854	585.586	3.658.590
2046	423.032	124.616	555.127	1.228.070	450.726	302.989	587.788	3.672.348
2047	424.486	125.044	557.034	1.232.290	452.275	304.030	589.808	3.684.968
2048	425.810	125.435	558.772	1.236.134	453.686	304.979	591.648	3.696.464
2049	427.005	125.786	560.340	1.239.602	454.959	305.834	593.308	3.706.835
2050	428.069	126.100	561.736	1.242.691	456.093	306.596	594.786	3.716.070
2051	429.002	126.375	562.960	1.245.399	457.087	307.264	596.082	3.724.169
2052	429.805	126.611	564.014	1.247.732	457.943	307.840	597.199	3.731.145

Ano	UPT/DF							População Urbana Total
	Central	Adjacente I	Adjacente II	Oeste	Norte	Leste	Sul	
2053	430.479	126.810	564.899	1.249.688	458.661	308.323	598.135	3.736.995
2054	431.021	126.970	565.610	1.251.262	459.238	308.711	598.889	3.741.702
2055	431.431	127.090	566.148	1.252.452	459.675	309.004	599.458	3.745.260
2056	431.710	127.172	566.514	1.253.261	459.972	309.204	599.845	3.747.678
2057	431.859	127.216	566.709	1.253.694	460.131	309.311	600.052	3.748.972
2058	431.879	127.222	566.736	1.253.752	460.152	309.325	600.080	3.749.146
2059	431.770	127.190	566.593	1.253.436	460.036	309.247	599.929	3.748.201

F. PROJEÇÃO POPULACIONAL URBANA (2018 A 2059) POR REGIÃO ADMINISTRATIVA (RA) DO DISTRITO FEDERAL

Tabela F.1 - Projeção populacional urbana (2018 a 2059) das RAs pertencentes à UPT Central, Oeste, Leste e Sul do DF.

ANO	UPT - CENTRAL				UPT - OESTE			UPT - LESTE			UPT - SUL			
	Brasília	Cruzei-ro	Sud./Oct.	Candan-golândia	Tagua-tinga	Ceilân-dia	Samam-baia	Paranoá	Jardim Botânico	Itapoã	Gama	Santa Maria	Recanto das Emas	Riacho Fundo II
2018	221.326	31.079	53.770	16.489	205.670	432.927	232.893	65.533	26.449	62.208	132.466	128.882	130.043	85.658
2019	229.685	33.480	56.066	17.423	219.999	464.220	239.771	50.687	26.986	63.635	140.870	132.168	142.365	52.364
2020	232.829	33.938	56.833	17.661	223.011	470.576	243.053	51.380	27.356	64.506	142.799	133.977	144.314	53.081
2021	235.923	34.389	57.588	17.896	225.974	476.827	246.282	52.063	27.719	65.363	144.696	135.757	146.231	53.786
2022	238.960	34.832	58.329	18.126	228.882	482.965	249.453	52.733	28.076	66.204	146.559	137.505	148.113	54.479
2023	241.934	35.265	59.055	18.352	231.731	488.976	252.557	53.390	28.425	67.028	148.383	139.216	149.957	55.157
2024	244.840	35.689	59.765	18.572	234.515	494.850	255.591	54.031	28.767	67.834	150.165	140.889	151.758	55.819
2025	247.675	36.102	60.457	18.787	237.231	500.581	258.551	54.657	29.100	68.619	151.904	142.520	153.515	56.466
2026	250.438	36.505	61.131	18.997	239.876	506.164	261.435	55.266	29.424	69.384	153.598	144.110	155.227	57.095
2027	253.124	36.896	61.787	19.201	242.449	511.593	264.239	55.859	29.740	70.129	155.246	145.655	156.893	57.708
2028	255.731	37.276	62.423	19.398	244.946	516.862	266.960	56.434	30.046	70.851	156.845	147.156	158.508	58.302
2029	258.257	37.645	63.040	19.590	247.366	521.967	269.597	56.992	30.343	71.551	158.394	148.609	160.074	58.878
2030	260.701	38.001	63.636	19.775	249.707	526.906	272.148	57.531	30.630	72.228	159.893	150.015	161.589	59.435
2031	263.066	38.346	64.214	19.955	251.973	531.688	274.618	58.053	30.908	72.883	161.344	151.377	163.055	59.974
2032	265.357	38.679	64.773	20.129	254.167	536.318	277.009	58.559	31.177	73.518	162.749	152.695	164.475	60.497
2033	267.572	39.002	65.314	20.297	256.288	540.794	279.321	59.047	31.437	74.132	164.107	153.969	165.848	61.002
2034	269.709	39.314	65.835	20.459	258.335	545.113	281.552	59.519	31.689	74.724	165.418	155.199	167.172	61.489
2035	271.767	39.614	66.338	20.615	260.307	549.274	283.701	59.973	31.930	75.294	166.680	156.383	168.448	61.958
2036	273.743	39.902	66.820	20.765	262.199	553.267	285.764	60.409	32.163	75.841	167.892	157.520	169.673	62.409
2037	275.633	40.177	67.281	20.908	264.009	557.087	287.737	60.826	32.385	76.365	169.051	158.608	170.844	62.839
2038	277.436	40.440	67.721	21.045	265.736	560.731	289.619	61.224	32.596	76.864	170.157	159.645	171.962	63.251

ANO	UPT - CENTRAL				UPT - OESTE			UPT - LESTE			UPT - SUL			
	Brasília	Cruzei-ro	Sud./ Oct.	Candan-golândia	Tagua-tinga	Ceilân-dia	Samam-baia	Paranoá	Jardim Botânico	Itapoã	Gama	Santa Maria	Recanto das Emas	Riacho Fundo II
2039	279.151	40.690	68.140	21.175	267.379	564.197	291.409	61.603	32.798	77.340	171.209	160.632	173.025	63.642
2040	280.777	40.927	68.537	21.298	268.937	567.484	293.107	61.962	32.989	77.790	172.206	161.568	174.033	64.012
2041	282.312	41.151	68.912	21.415	270.407	570.586	294.709	62.300	33.169	78.215	173.147	162.451	174.984	64.362
2042	283.754	41.361	69.264	21.524	271.788	573.500	296.214	62.618	33.339	78.615	174.032	163.281	175.878	64.691
2043	285.105	41.558	69.593	21.626	273.082	576.230	297.624	62.917	33.498	78.989	174.860	164.058	176.715	64.999
2044	286.366	41.742	69.901	21.722	274.290	578.779	298.941	63.195	33.646	79.339	175.634	164.784	177.497	65.286
2045	287.537	41.913	70.187	21.811	275.411	581.146	300.163	63.453	33.783	79.663	176.352	165.458	178.223	65.553
2046	288.618	42.070	70.451	21.893	276.447	583.332	301.292	63.692	33.910	79.963	177.015	166.080	178.893	65.800
2047	289.610	42.215	70.693	21.968	277.397	585.336	302.327	63.911	34.027	80.237	177.623	166.651	179.508	66.026
2048	290.514	42.346	70.914	22.037	278.262	587.162	303.270	64.110	34.133	80.488	178.178	167.171	180.068	66.232
2049	291.329	42.465	71.113	22.099	279.043	588.809	304.121	64.290	34.229	80.713	178.677	167.640	180.573	66.418
2050	292.054	42.571	71.290	22.154	279.738	590.276	304.879	64.450	34.314	80.915	179.123	168.057	181.023	66.583
2051	292.691	42.664	71.445	22.202	280.348	591.563	305.544	64.591	34.389	81.091	179.513	168.424	181.417	66.728
2052	293.239	42.744	71.579	22.244	280.873	592.671	306.116	64.712	34.453	81.243	179.849	168.739	181.757	66.853
2053	293.699	42.811	71.691	22.278	281.314	593.600	306.596	64.813	34.507	81.370	180.131	169.004	182.042	66.958
2054	294.069	42.865	71.781	22.306	281.668	594.348	306.982	64.895	34.551	81.473	180.358	169.217	182.271	67.043
2055	294.349	42.905	71.850	22.328	281.936	594.913	307.274	64.956	34.584	81.550	180.530	169.377	182.445	67.106
2056	294.539	42.933	71.896	22.342	282.118	595.297	307.472	64.998	34.606	81.603	180.646	169.487	182.562	67.150
2057	294.640	42.948	71.921	22.350	282.215	595.503	307.578	65.021	34.618	81.631	180.709	169.545	182.625	67.173
2058	294.654	42.950	71.924	22.351	282.228	595.530	307.593	65.024	34.619	81.635	180.717	169.553	182.634	67.176
2059	294.580	42.939	71.906	22.345	282.157	595.380	307.515	65.007	34.611	81.614	180.671	169.510	182.588	67.159

Tabela F.2 - Projeção populacional urbana (2018 a 2059) das RAs pertencentes à UPT Adjacente I e Adjacente II do DF.

ANO	UPT - ADJACENTE I				UPT - ADJACENTE II						
	Lago Sul	Varjão	Park Way	Lago Norte	Guará	SCIA/ Estrutural	SIA	Núcleo Bandeirante	Riacho Fundo	Águas Claras	Vicente Pires
2018	29.754	8.802	20.511	33.103	134.002	35.520	1.549	23.619	41.410	161.184	66.491
2019	32.003	9.541	21.063	36.564	129.032	36.832	2.298	25.037	40.433	134.243	73.900
2020	32.441	9.671	21.351	37.065	130.798	37.336	2.329	25.380	40.987	136.081	74.911
2021	32.872	9.800	21.635	37.557	132.536	37.832	2.360	25.717	41.531	137.889	75.907
2022	33.295	9.926	21.913	38.041	134.242	38.319	2.391	26.048	42.066	139.664	76.884
2023	33.709	10.050	22.186	38.514	135.913	38.796	2.421	26.372	42.590	141.402	77.841
2024	34.114	10.170	22.452	38.977	137.545	39.262	2.450	26.689	43.101	143.101	78.776
2025	34.509	10.288	22.712	39.428	139.138	39.716	2.478	26.998	43.600	144.758	79.688
2026	34.894	10.403	22.966	39.868	140.690	40.159	2.506	27.299	44.087	146.373	80.577
2027	35.269	10.514	23.212	40.296	142.199	40.590	2.532	27.592	44.559	147.943	81.441
2028	35.632	10.623	23.451	40.711	143.664	41.008	2.559	27.876	45.018	149.466	82.280
2029	35.984	10.728	23.683	41.113	145.083	41.413	2.584	28.152	45.463	150.943	83.092
2030	36.324	10.829	23.907	41.502	146.455	41.805	2.608	28.418	45.893	152.371	83.879
2031	36.654	10.927	24.124	41.878	147.784	42.185	2.632	28.676	46.310	153.754	84.640
2032	36.973	11.023	24.334	42.243	149.071	42.552	2.655	28.926	46.713	155.093	85.377
2033	37.282	11.115	24.537	42.596	150.315	42.907	2.677	29.167	47.103	156.387	86.089
2034	37.579	11.203	24.733	42.936	151.516	43.250	2.698	29.400	47.479	157.636	86.777
2035	37.866	11.289	24.922	43.264	152.672	43.580	2.719	29.624	47.841	158.839	87.439
2036	38.142	11.371	25.103	43.578	153.782	43.897	2.739	29.840	48.189	159.994	88.075
2037	38.405	11.449	25.276	43.879	154.844	44.200	2.758	30.046	48.522	161.099	88.683
2038	38.656	11.524	25.442	44.166	155.857	44.489	2.776	30.242	48.839	162.152	89.263
2039	38.895	11.596	25.599	44.439	156.820	44.764	2.793	30.429	49.141	163.155	89.815
2040	39.122	11.663	25.748	44.698	157.734	45.025	2.809	30.606	49.428	164.105	90.338

ANO	UPT - ADJACENTE I				UPT - ADJACENTE II						
	Lago Sul	Varjão	Park Way	Lago Norte	Guará	SCIA/ Estrutural	SIA	Núcleo Bandeirante	Riacho Fundo	Águas Claras	Vicente Pires
2041	39.336	11.727	25.889	44.942	158.596	45.271	2.825	30.774	49.698	165.002	90.832
2042	39.536	11.787	26.021	45.172	159.406	45.502	2.839	30.931	49.952	165.845	91.296
2043	39.725	11.843	26.145	45.387	160.165	45.719	2.852	31.078	50.189	166.635	91.731
2044	39.900	11.895	26.261	45.588	160.874	45.921	2.865	31.216	50.411	167.372	92.136
2045	40.064	11.944	26.368	45.774	161.531	46.109	2.877	31.343	50.617	168.056	92.513
2046	40.214	11.989	26.467	45.946	162.139	46.282	2.888	31.461	50.808	168.688	92.861
2047	40.352	12.030	26.558	46.104	162.696	46.441	2.898	31.569	50.982	169.268	93.180
2048	40.478	12.068	26.641	46.248	163.204	46.586	2.907	31.668	51.141	169.796	93.471
2049	40.592	12.101	26.716	46.378	163.662	46.717	2.915	31.757	51.285	170.272	93.733
2050	40.693	12.132	26.782	46.493	164.069	46.833	2.922	31.836	51.413	170.696	93.967
2051	40.782	12.158	26.841	46.594	164.427	46.935	2.928	31.905	51.525	171.069	94.171
2052	40.858	12.181	26.891	46.682	164.735	47.023	2.934	31.965	51.621	171.389	94.348
2053	40.922	12.200	26.933	46.755	164.993	47.097	2.938	32.015	51.702	171.658	94.496
2054	40.974	12.215	26.967	46.814	165.201	47.156	2.942	32.055	51.767	171.874	94.615
2055	41.013	12.227	26.993	46.858	165.358	47.201	2.945	32.086	51.817	172.037	94.705
2056	41.039	12.235	27.010	46.889	165.465	47.231	2.947	32.106	51.850	172.148	94.766
2057	41.053	12.239	27.019	46.905	165.522	47.248	2.948	32.118	51.868	172.208	94.799
2058	41.055	12.240	27.021	46.907	165.530	47.250	2.948	32.119	51.870	172.216	94.803
2059	41.045	12.236	27.014	46.895	165.488	47.238	2.947	32.111	51.857	172.172	94.779