

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

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE INTEGRAÇÃO DO
SISTEMA CORUMBÁ AO SISTEMA PRODUTOR DE ÁGUA
DO DISTRITO FEDERAL EM MEIO A INCERTEZAS
PROFUNDAS E CLIMÁTICAS**

JOSÉ LUÍS POLYGACZ DE NAZARENO

**ORIENTADORA: CONCEIÇÃO DE MARIA ALBUQUERQUE
ALVES**

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

**PUBLICAÇÃO: PPGTARH. DM – 274/2024
BRASÍLIA/DF AGOSTO - 2024**

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

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE INTEGRAÇÃO DO SISTEMA
CORUMBÁ AO SISTEMA PRODUTOR DE ÁGUA DO DISTRITO
FEDERAL EM MEIO A INCERTEZAS PROFUNDAS E
CLIMÁTICAS**

JOSÉ LUÍS POLYGACZ DE NAZARENO

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

APROVADA POR:

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

Prof. Ricardo Tezini Minoti, DSc (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Guilherme Fernandes Marques, PhD (UFRGS)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 30 DE AGOSTO DE 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

NAZARENO, JOSÉ LUÍS POLYGACZ DE

Análise de alternativas de integração do Sistema Corumbá ao Sistema Produtor de Água do Distrito Federal em meio a incertezas profundas e climáticas [Distrito Federal] 2024.

168p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2024).

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Planejamento de sistemas hídricos urbanos

2. Incertezas Profundas

3. Análise multiobjetivo

4. Sistema de apoio à decisão

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NAZARENO, J. L. P. D. (2024). Análise de alternativas de integração do Sistema Corumbá ao Sistema Produtor de Água do Distrito Federal em meio a incertezas profundas e climáticas. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PPGTARH. DM – 274/2024, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: José Luís Polygacz de Nazareno.

TÍTULO: Análise de alternativas de integração do Sistema Corumbá ao Sistema Produtor de Água do Distrito Federal em meio a incertezas profundas e climáticas.

GRAU: Mestre

ANO: 2024

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. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

José Luís Polygacz de Nazareno

Rua 28 Norte, Lote 4, Bloco B, Apartamento 103 – Águas Claras.

71.917-720 Brasília – DF – Brasil.

*À minha família,
sempre!*

AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa, Kelly, pela paciência e por todo o suporte durante esse processo, e aos meus filhos, Nicolás e Mônica, por terem me aguardado para brincar. Espero recompensá-los da forma como merecem.

Aos meus pais, Nilceu e Maria Cristina, que sempre me serviram de exemplo e me passaram os valores mais preciosos que eu poderia carregar. Sem vocês, jamais teria chegado aonde cheguei.

À Professora Conceição, por sua orientação valiosa e a confiança transmitida durante as reuniões, que contribuíram enormemente para a minha formação.

A todos os professores do PTARH, que participaram dessa etapa da minha formação profissional.

Aos colegas do PTARH, com quem compartilhei disciplinas ou que me auxiliaram de alguma forma nesse trabalho, como o Eduardo e a Brunna.

Aos meus colegas da Caesb, especialmente Diogo, Cláudia, Wellington, José Ricardo, Eloneide, Eliane e Vanusa, pelo incentivo constante e pelos conselhos na maturação das idéias que auxiliaram a superar esse desafio.

À Caesb pelo fornecimento dos dados, apoio ao desenvolvimento profissional e desafio pessoal.

RESUMO

ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE INTEGRAÇÃO DO SISTEMA CORUMBÁ AO SISTEMA PRODUTOR DE ÁGUA DO DISTRITO FEDERAL EM MEIO A INCERTEZAS PROFUNDAS E CLIMÁTICAS

O presente estudo desenvolveu uma metodologia simplificada para avaliação de alternativas de integração do sistema Corumbá ao abastecimento de água do Distrito Federal do Brasil em meio a incertezas profundas e climáticas. Foi utilizada a plataforma Water Evaluation And Planning System (WEAP) para incorporação de variações climáticas e de incertezas profundas (crescimento de demanda e redução de perdas), onde três configurações de operação e distribuição de água foram avaliadas, definindo-se critérios de desempenho específicos para o sistema de distribuição, entre os anos de 2021 e 2060. As alternativas de integração foram submetidas a 108.000 simulações de cenários e os desempenhos foram avaliados através de três objetivos: redução de intensidade de falhas de atendimento, redução de consumo de energia elétrica e redução de falhas de reservação. Estabelecendo-se critérios de desempenho para tais objetivos, foram identificadas configurações operacionais de rede, ou alternativas de abastecimento, mais favoráveis. Através do estabelecimento da média dos resultados desses objetivos como limites, foi possível a seleção de uma alternativa mais favorável. Com isso, verificou-se que as alternativas de abastecimento que possuem áreas específicas abastecidas pela ETA Brasília, segunda maior estação de tratamento de água do Distrito Federal, foram as que apresentaram um maior número de simulações atendendo ao critério de desempenho. Agora, se o principal objetivo a ser respeitado for o atendimento às demandas dos usuários, ou seja, avaliando apenas os menores resultados de intensidade de falhas de atendimento, a melhor alternativa se torna aquela em que a ETA Brasília não atende a essas mesmas áreas específicas. Neste trabalho, observou-se que uma redução de crescimento da demanda apresenta melhor desempenho comparado a redução de perdas reais em mesma proporção, ressaltando a importância de campanhas de uso racional de água como política permanente de atuação de companhias de saneamento. A metodologia proposta permite, de forma simplificada, a avaliação de alternativas de soluções para abastecimento de água a partir de critérios e prioridades que melhor expressem os anseios da concessionária de abastecimento de água e das comunidades atendidas.

Palavras-chave: planejamento de sistemas hídricos urbanos, incertezas profundas, análise multiobjetivo, sistema de apoio a decisão.

ABSTRACT

ANALYSIS OF ALTERNATIVES FOR INTEGRATING THE CORUMBÁ SYSTEM INTO THE WATER SUPPLY SYSTEM OF THE FEDERAL DISTRICT UNDER DEEP AND CLIMATIC UNCERTAINTIES

This study developed a simplified methodology for evaluating alternatives for integrating the Corumbá system into the water supply of the Federal District of Brazil under deep and climatic uncertainties. The Water Evaluation and Planning System (WEAP) platform was used to incorporate climatic variations and deep uncertainties (demand growth and water loss reduction), where three configurations of water operation and distribution were evaluated, defining specific performance criteria for the distribution system between 2021 and 2060. The integration alternatives were subjected to 108,000 scenario simulations, and their performances were assessed through three objectives: reduction of service failure intensity, reduction of energy consumption, and reduction of reservoir failures. By establishing performance criteria for these objectives, more favorable network operational configurations, or supply alternatives, were identified. Through the establishment of the average results of these objectives as thresholds, a more favorable alternative was selected. It was observed that the supply alternatives, which have specific areas served by ETA Brasília, the second-largest water treatment plant in the Federal District, presented the highest number of simulations meeting the performance criterion. However, if the primary objective is to meet user demands, evaluating only the lowest service failure intensity results, the best alternative becomes the one where ETA Brasília does not serve these specific areas. This study also observed that a reduction in demand growth presents better performance compared to an equivalent reduction in real losses, highlighting the importance of water-saving campaigns as a permanent policy of water utility companies. The proposed methodology allows, in a simplified manner, the evaluation of water supply solution alternatives based on criteria and priorities that best express the aspirations of the water supply concessionaire and the served communities.

Keywords: urban water systems planning, deep uncertainties, multi-objective analysis, decision support system.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Objetivos	5
2.1	Objetivo Geral	5
2.2	Objetivos Específicos	5
3	Revisão Bibliográfica.....	6
3.1	Preocupação internacional e nacional na questão hídrica	6
3.2	Gestão adaptativa e planejamento de sistemas hídricos	8
3.3	Gestão de risco sob incertezas bem caracterizadas e profundas.....	9
3.1.1.	Métodos de implementação de gestão adaptativa.....	11
3.4	Modelos de simulação de sistemas hídricos	14
3.5	O WEAP como ferramenta de análise.....	16
4	Metodologia	22
4.1	Formulação do Problema.....	22
4.1.1	Delimitação das áreas de serviço.....	22
4.1.2	Definição dos objetivos da análise	23
4.2	Definição das alternativas de abastecimento e elaboração dos cenários	24
4.2.1	Definição dos limites das incertezas.....	24
4.2.2	Definição das alternativas de abastecimento	24
4.2.3	Elaboração do conjunto de cenários	25
4.3	Simulação no WEAP	26
4.4	Avaliação da Robustez das Alternativas de abastecimento.....	28
4.4.1	Avaliação Multiobjetivo dos Resultados.....	28
4.4.2	Seleção da alternativa de abastecimento mais favorável.....	30
5	Estudo de Caso Aplicado ao Distrito Federal	32
5.1	Delimitação das áreas de serviço.....	34
5.2	Definição das alternativas de abastecimento	36

5.3	Elaboração do conjunto de cenários	37
5.3.1	Representação dos Sistemas Produtores.....	39
5.3.2	Levantamento populacional.....	42
5.3.3	Determinação da Produção e Demanda de água	42
5.3.4	Determinação da Demanda.....	43
5.3.5	Determinação da população atendida	45
5.3.6	Evolução da demanda.....	47
5.3.7	Transferências de água entre sistemas.....	47
5.3.8	Comportamento dos Reservatórios.....	47
5.3.9	Capacidade de produção	49
5.3.10	Priorização de mananciais	51
5.4	Simulação	52
5.5	Avaliação dos resultados	52
5.5.1	Consumo de energia elétrica.....	52
5.5.2	Intensidade das falhas no atendimento	54
5.5.3	Falhas na reservação	55
5.5.4	Redução de perdas	56
5.6	Resultados.....	57
6	Conclusão.....	74
7	Recomendações para trabalhos futuros	76
8	Referências Bibliográficas	77
	Apêndices	84
	A - Vazões médias anuais produzidas por sistema produtor	85
	B - Cenários simulados	87
	C - Scripts	90
	C.1 Cálculo dos cenários no WEAP.....	90
	C.2 Exportação dos resultados no WEAP	90
	C.3 Código para geração dos indicadores e gráficos no R.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Distribuição percentual da produção de água no Distrito Federal em 2022 pela Caesb.	33
Tabela 5.2 - Sistemas produtores de água operados pela Caesb, suas captações e unidades de tratamento (ETAs).	33
Tabela 5.3 - Listagem de cenários formados a partir da combinação de alternativa de abastecimento e incertezas profundas (crescimento de demanda e redução de perdas).	38
Tabela 5.4 – Áreas de serviço e a população atendida por cada uma em 2020.	42
Tabela 5.5 - Produção média de água por sistema produtor de água de 2017 à 2022.	43
Tabela 5.6 - Demanda dos sistemas produtores de água do Distrito Federal.	43
Tabela 5.7 - Demanda água por área de serviço.	44
Tabela 5.8 - Relação da proporção de produção de água entre as Estações de Tratamento de Água e as demais unidades de tratamento dos sistemas produtores de água do Distrito Federal.	46
Tabela 5.9 - População de cada área de serviço efetivamente atendida pelas ETAs Rio Descoberto, Brasília e Lago Norte de Água do Distrito Federal.	46
Tabela 5.10 - Capacidade de produção das ETAs.	50
Tabela 5.11 - Capacidade efetiva de produção das ETAs.	51
Tabela 5.12 - Parametrização do consumo de energia elétrica (kWh) da EAB.COR.001. .	53
Tabela 5.13 - Bloco de unidades relacionadas às ETAs que compõe o consumo de energia elétrica.	53
Tabela 5.14 - Consumo médio por volume produzido das ETAs (kWh/m3).	54
Tabela 5.15 - Conjunto de resultados dos objetivos relacionados às alternativas de abastecimento.	57
Tabela 5.16 - Simulações pertencentes a cada alternativa de abastecimento.	63
Tabela 5.17 - Simulações pertencentes a cada Alternativa de Abastecimento por crescimento da demanda.	64
Tabela 5.18 – Resultados do objetivo intensidade de falha de atendimento por área de serviço.	65
Tabela 5.19 - Data inicial comparativa entre áreas de serviço.	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Ranking da severidade de riscos globais. Fonte: Adaptado de WEF (2024).....	6
Figura 3.2 - Evolução dos usos da água no Brasil. Fonte: ANA, 2024.....	7
Figura 3.3 – Representação da operação dos reservatórios de acumulação no WEAP.....	19
Figura 4.1 - Diagrama geral da metodologia.....	22
Figura 5.1 - Mapa de localização dos lagos de acumulação e representação dos limites do Distrito Federal com o estado de Goiás.....	32
Figura 5.2 - Representação da integração entre as áreas de serviço.....	35
Figura 5.3 - Ponto de integração da água da ETA.COR.001 no Distrito Federal.	36
Figura 5.4 - Representação esquemática das alternativas de abastecimento.....	37
Figura 5.5 – Alternativas de abastecimento e composição dos cenários.....	38
Figura 5.6 - Representação real da interligação entre os sistemas.	40
Figura 5.7 - Representação simplificada da integração entre os sistemas no WEAP.	41
Figura 5.8 - Gráfico de coordenadas paralelas dos resultados e sentido preferencial dos objetivos.	59
Figura 5.9 - Desempenho da Alternativa de Abastecimento 1 (36.000 simulações) em relação à todas as simulações (108.000 simulações).	59
Figura 5.10 - Desempenho da Alternativa de Abastecimento 2 (36.000 simulações) em relação à todas as simulações (108.000 simulações).....	60
Figura 5.11 - Desempenho da Alternativa de abastecimento 3 (36.000 simulações) em relação à todas as simulações (108.000 simulações).....	60
Figura 5.12 – Seleção das simulações que atendem aos critérios de desempenho dos objetivos.	62
Figura 5.13 – Simulações que atenderam ao critério de desempenho dos objetivos separados pela redução de perdas.....	63
Figura 5.14 - Simulações que atenderam ao critério de desempenho dos objetivos separados pelo crescimento de demanda.....	64
Figura 5.15 - Comparativo das intensidades de falha de atendimento médios dos cenários nas 3 alternativas de abastecimento.....	67
Figura 5.16 - Intensidade de falha de atendimento anual média dos cenários na alternativa de abastecimento 1.....	68

Figura 5.17 - Intensidade de falha de atendimento anual média dos cenários na alternativa de abastecimento 2.....	69
Figura 5.18 - Intensidade de falha de atendimento anual média dos cenários na alternativa de abastecimento 3.....	69
Figura 5.19 – Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço Exclusiva 1 (Alternativa de abastecimento 2).....	70
Figura 5.20 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço Exclusiva 2 (Alternativa de abastecimento 2).....	71
Figura 5.21 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço 1 (Alternativa de abastecimento 2).....	71
Figura 5.22 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço 3 (Alternativa de abastecimento 2).....	72
Figura 5.23 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço 2 (Alternativa de abastecimento 2).....	72
Figura 5.24 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço Exclusiva 3 (Alternativa de abastecimento 2).....	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

Adasa	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AS	Área de Serviço
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
Cagece	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CEB	Companhia Energética de Brasília
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
DMDU	Tomada de Decisão Mediante Incertezas Profundas (Decision Making Under Deep Uncertainty)
DU	Incertezas Profundas (Deep Uncertainty)
EAB.COR.001	Elevatória Água Bruta Corumbá 1
EAB.LPA.002	Elevatória Água Bruta Lago Paranoá 2
EAB.RBA.001	Elevatória Água Bruta Ribeirão Banana1 1
EAB.RBA.002	Elevatória Água Bruta Ribeirão Bananal 2
EAB.RDE.001	Elevatória Água Bruta Descoberto
EAB.SMR.001	Elevatória Água Bruta Santa Maria
EAB.TOR.001	Elevatória Água Bruta Torto
EAT.LNT.003	Elevatória Água Tratada Lago Norte 3
EAT.MNT.001	Elevatória Água Tratada M-Norte 1
EAT.MNT.002	Elevatória Água Tratada M-Norte 2
EAT.MNT.003	Elevatória Água Tratada M-Norte 3
EAT.MNT.004	Elevatória Água Tratada M-Norte 4
EAT.PPL.001	Elevatória Água Tratada Plano Piloto 1
EAT.VLG.001	Elevatória Água Tratada Valparaíso de Goiás 1
EBO.MNT.001	Elevatória Booster M-Norte 1
EBO.MNT.002	Elevatória Booster M-Norte 2
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETA.BSB.001	Estação de Tratamento de Água Brasília
ETA.COR.001	Estação de Tratamento de Água Corumbá
ETA.LNT.001	Estação de Tratamento de Água Lago Norte
ETA.RDE.001	Estação de Tratamento de Água Rio Descoberto

ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GDF	Governo do Distrito Federal
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBC	Incertezas bem caracterizadas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Incertezas profundas
MILP	Programação Linear Inteira Mista
MORDM	Tomada de Decisão Robusta Multiobjetivo (Multiobjective RDM)
PDSB	Plano Distrital de Saneamento Básico
PTARH	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
RA	Região Administrativa
RDM	Tomada de Decisão Robusta (Robust Decisionmaking)
RIBASIM	River Basin Simulation Model
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
WBalMo	Water balance Model
WEAP	Water Evaluation and Planning System
WEF	Fórum Econômico Mundial (World Economic Forum)

1 INTRODUÇÃO

As decisões na realização de investimentos de grande vulto e ações de controle de escassez de água devem considerar a complexidade de fatores envolvidos em previsões de longo prazo, que envolvem variáveis complexas e um elevado grau de incertezas. Em um horizonte de longo prazo, não se pode afirmar que a disponibilidade hídrica, tampouco o crescimento de demanda por água, manterão padrões constantes de crescimento.

No cenário internacional, tomadores de decisões têm avançado na possibilidade de incorporar o conceito de incertezas profundas e bem caracterizadas em suas projeções futuras, avaliando suas implicações ao procurar respostas para questões de escassez de recursos na gestão de risco (Basheer, M. *et al.*, 2021; Basheer, M. *et al.*, 2023; Kingsborough, A. *et al.*, 2016). Incertezas profundas são definidas como aquelas que apresentam difícil tratamento e para as quais não há consenso claro na sua representação (Lempert *et al.*, 2003). No âmbito do planejamento de longo prazo de sistemas hídricos em geral, dados de séries temporais de vazão de rios ou de outros processos hidrológicos, como evapotranspiração, podem ser extrapolados através de modelos estatísticos, sendo, portanto, denominados de incertezas bem caracterizadas. Já outras variáveis ou fatores para os quais não se tem consenso no estabelecimento de seus limites e tampouco tratamento analítico, são definidas como incertezas profundas, tendo como exemplos a possível variação de aspectos econômicos e sociais relacionados ao planejamento desejado. Para o caso de sistemas hídricos de abastecimento de água tem-se como possíveis fatores de incerteza profunda a tarifa de água, a alteração no padrão de consumo ou do crescimento populacional, a efetividade de campanhas de educação ambiental ou de tecnologias recém implantadas, entre outros.

Para Lempert *et al.* (2003), vislumbrar condições futuras de mundo são ações que sempre fizeram parte das sociedades. A percepção de padrões registrados em dados históricos se torna uma ferramenta poderosa quando traçamos paralelos entre o passado e estabelecemos condições futuras, de forma a embasar as políticas de longo prazo. Com auxílio computacional, durante a formulação de políticas de longo prazo, conjuntos de cenários são testados ao se comparar os resultados de múltiplos cenários futuros. Para o planejamento de longo prazo de sistemas produtores de água para o abastecimento humano, essa prática se torna essencial, já que esses sistemas envolvem grandes infraestruturas.

Matalas e Fiering (1977) definem robustez como a insensibilidade do projeto do sistema a erros, aleatórios ou não, nas estimativas daqueles parâmetros que afetam a escolha do projeto. Buscando-se atingir múltiplos objetivos de performance, ao se tratar do planejamento de longo prazo de sistemas hídricos, as decisões robustas são aquelas tomadas pelos decisores, que resistem às variações em suas projeções (Herman *et al.*, 2015). Segundo Kuhn e Madanat (2005), os fenômenos da natureza apresentam desafios significativos na otimização de sistemas robustos.

Para Brockway *et al.* (2022), as mudanças climáticas apresentam um grande risco à infraestrutura de grande porte, trazendo incertezas consideráveis que desafiam as abordagens tradicionais de planejamento. Bilhões de pessoas ao redor do globo dependem de grandes sistemas de infraestruturas existentes, como energia elétrica, água e transporte para suas necessidades diárias. Os padrões de mudança climática já começaram a sobrecarregar esses sistemas e, com as projeções ambientais em condições extremas, há um prenúncio de significativo estresse para os próximos anos. Da mesma forma que acontece no setor elétrico, uma das grandes dificuldades encontradas é que as incertezas presentes no futuro climático e suas implicações requerem um entendimento aprofundado sobre as incertezas presentes no planejamento (Brockway *et al.* 2022). As incertezas levantadas são as relacionadas aos impactos das infraestruturas, políticas e ações regulatórias, comportamento do consumidor e condições climáticas futuras.

O planejamento flexível permite mudar ou alterar uma decisão a depender dos resultados apresentados, considerando a natureza dinâmica das tomadas de decisões e o impacto humano sobre as águas (Borgomeo *et al.*, 2018).

A materialização do planejamento por parte do poder público é uma importante ferramenta para a definição das atribuições e objetivos traçados de acordo com as suas temáticas aos atores envolvidos. Em 2017, foi elaborado o Plano Distrital de Saneamento Básico - PDSB, onde através de diagnósticos e prognósticos, definiram-se metas e objetivos para universalização do saneamento nos limites do Distrito Federal (GDF, 2017b). Para se atingir os objetivos desse plano, a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal - Caesb elaborou o Plano de Exploração, onde se projetou para os próximos 20 anos os investimentos necessários para tal (Caesb, 2021).

Ainda sobre o Distrito Federal, com a promessa futura de garantir a segurança hídrica do sistema produtor de água existente, em abril de 2022, entrou em pré-operação o Sistema Corumbá. Esse sistema é formado pelas unidades operacionais envolvidas desde a captação em seu manancial, o reservatório de Corumbá IV, com tratamento na Estação de Tratamento de Água Corumbá (ETA.COR.001), até a adução ao Distrito Federal. A captação desse sistema no reservatório de Corumbá IV, está localizada no município de Luziânia, Goiás.. O ponto de captação está localizado à cerca de 20 km do limite com o Distrito Federal, possuindo um desnível geométrico aproximado de 240 m. Isso, por si só, já antecipa um alto custo energético para a inserção da água desse sistema no contexto de produção do Distrito Federal. Assim, estratégias para redução de custo e tomadas de decisões robustas se fazem necessárias.

Antes mesmo da entrada do Sistema Corumbá em operação, estudos de cenários futuros para o Sistema de Abastecimento de Água do Distrito Federal envolvendo o conceito de incertezas profundas foram desenvolvidos, com a avaliação dos momentos ideais para ações de curto e médio prazos, a fim de garantir a segurança hídrica da região (Giacomazzo, 2020; Araújo, 2023). Entretanto, após iniciada a operação do Sistema Corumbá, ainda pouco se sabe a respeito das melhores condições de operação, investimentos futuros e ações de curto prazo afim de possibilitar o cumprimento das expectativas com o sistema e manutenção do abastecimento de água seguro no Distrito Federal.

Os estudos de Giacomazzo (2020) e Araújo (2023) utilizaram metodologia de análise multiobjetivo com a construção de múltiplos cenários formados por incertezas bem caracterizadas, como séries de vazão e evaporação, combinadas a incertezas profundas. Foram traçados portfolios de gestão onde ações são encadeadas, minimizando os impactos negativos e equilibrando a manutenção dos níveis dos reservatórios com atendimento adequado à população, de forma a apresentar os melhores resultados a longo prazo.

Enquanto o modelo Waterpaths foi utilizado por Giacomazzo (2020) e Araújo (2023), o presente trabalho propõe a utilização do WEAP (Water Evaluation and Planning System), um software passível de incorporação pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal.

O presente trabalho apresenta uma abordagem metodológica que auxilia na definição de novas formas de operação, através da seleção de alternativas de abastecimento pré-definidas, que podem ser incorporadas ao planejamento da operação do Sistema Corumbá integrado ao sistema produtor de água do Distrito Federal. Essa seleção visa ao melhor aproveitamento dos recursos hídricos e infraestruturas existentes, ao se combinar as simulações de condições climáticas futuras com cenários futuros de vazão e evaporação, acoplados a incertezas profundas, de forma a atender aos objetivos a serem apresentados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente pesquisa é conceber e analisar estratégias para planejamento de longo prazo de sistemas produtores de água, considerando cenários de incertezas profundas e climáticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos dessa pesquisa:

- Identificar e avaliar o desempenho de alternativas de abastecimento do Sistema Produtor de Água do DF com o Sistema Corumbá, que atendam aos objetivos previamente estabelecidos para atendimento;
- Identificar e analisar sinergias entre objetivos do Sistema Produtor de Água do DF com o Sistema Corumbá diante de incertezas profundas associadas ao seu planejamento de longo prazo;
- Identificar e avaliar alternativas de operação de interligações entre os Subsistemas Produtores de Água do DF e o novo Sistema Corumbá no contexto de incertezas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o contexto científico em que este trabalho foi desenvolvido, sendo dividido em quatro tópicos principais. No item 3.1 são abordadas as preocupações relacionadas às questões hídricas, tanto no cenário internacional quanto no nacional. O item 3.2 trata dos conceitos associados à gestão adaptativa e ao planejamento de sistemas hídricos. No item 3.3, são tratadas as questões relacionadas à gestão de riscos sob incertezas profundas e bem caracterizadas. No item 3.4, são apresentados os modelos mais utilizados na simulação de sistemas hídricos. Finalmente, no item 3.5, discorre-se detalhadamente sobre o modelo escolhido para este trabalho.

3.1 PREOCUPAÇÃO INTERNACIONAL E NACIONAL NA QUESTÃO HÍDRICA

O Fórum Econômico Mundial (WEF, 2024), em sua Pesquisa de Percepção de Riscos Globais de 2024, divulgou os resultados que destacam as principais preocupações de curto e longo prazo de especialistas de diversos setores. Em ambos os períodos, as alterações climáticas aparecem como uma preocupação significativa, sendo ainda mais preocupantes para o futuro, conforme ilustrado na Figura 3.1.

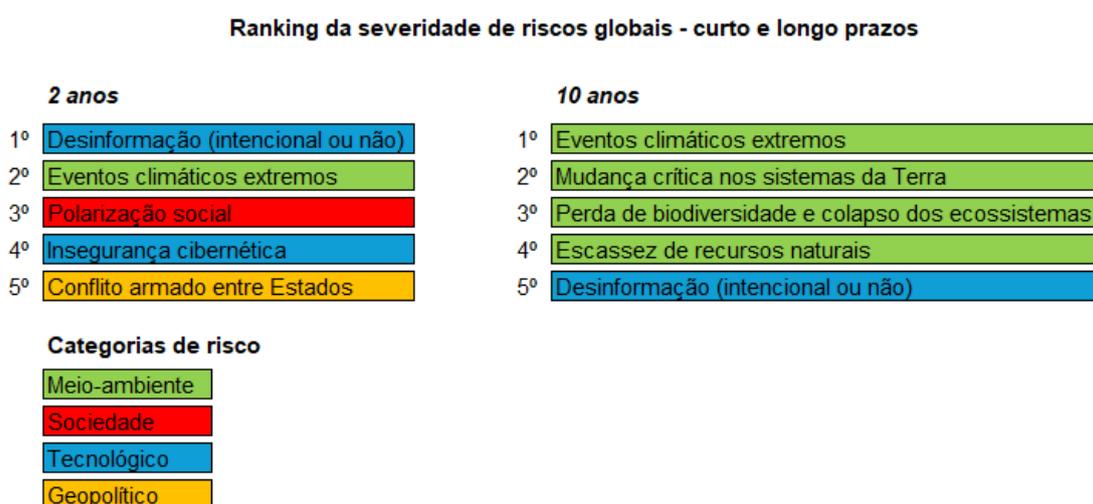


Figura 3.1 - Ranking da severidade de riscos globais. Fonte: Adaptado de WEF (2024).

Essa visão é reforçada pelos riscos crescentes associados aos impactos climáticos e ao aumento da temperatura global, o que destaca a necessidade urgente de adaptação das ações globais (UNEP, 2023).

Para Burek *et al.* (2016), em um contexto global, nas próximas décadas haverá um crescimento na demanda por água, tanto para o consumo humano, quanto para a produção de alimentos e energia. Aumentará ainda mais a pressão sobre os recursos hídricos, com uma redução cada vez maior na disponibilidade por recursos de baixo custo, intensificada pelas mudanças climáticas.

Segundo o grupo de águas das Nações Unidas (UNW, 2023), o consumo mundial de água tem aumentado aproximadamente 1% ao ano pelos últimos 40 anos. Esse crescimento aproximado também foi projetado para o Distrito Federal, onde se estima um crescimento populacional na ordem de 12%, entre 2020 e 2030 (Codeplan, 2022).

No Brasil, nas últimas décadas houve um crescimento expressivo do uso da água para todos os setores da economia, como exemplos, irrigação e abastecimento humanos, verificado na Figura 3.2. Esse crescimento pode ser intensificado pelas mudanças climáticas, onde o aumento da temperatura ou secas podem levar à maior necessidade do uso da água (ANA, 2024).

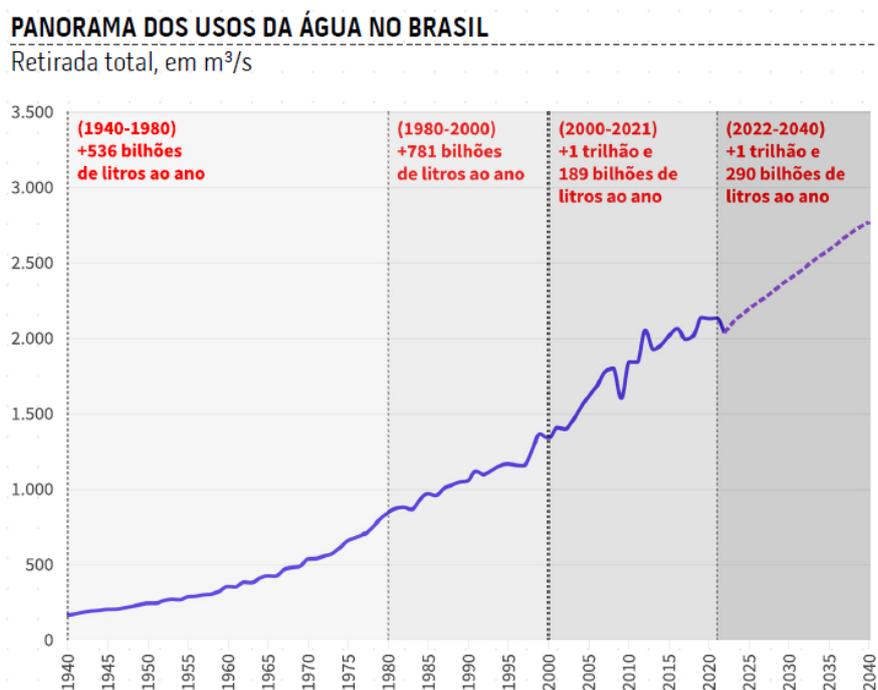


Figura 3.2 - Evolução dos usos da água no Brasil. Fonte: ANA, 2024.

A variação das vazões fluviais não necessariamente reflete o padrão das precipitações, evidenciando que fatores além do clima, como os relacionados ao uso da água, operação das infraestruturas, e ocupação do solo, entre outros, influenciam de forma significativa a disponibilidade hídrica (ANA, 2024).

Em passado recente, alterações nos regimes das chuvas levaram a crises hídricas que ficaram em evidência nacional, como a escassez hídrica de 2012 no Ceará (Cagece, 2022), a de 2014 em São Paulo, tendo o Sistema Cantareira como o mais prejudicado (Sabesp, 2015) e a de 2016 no Distrito Federal, que atingiu principalmente os reservatórios do Descoberto e de Santa Maria. (GDF, 2017a). Esses eventos nacionais, em um curto período, reforçam a necessidade de se dispor de ferramentas de apoio ao planejamento de longo prazo para sistemas hídricos resultando no auxílio ao enfrentamento de períodos de estiagem prolongada.

Apesar do Brasil ter passado por diversas crises nos seus sistemas de abastecimento, percebe-se a necessidade de ampliar a discussão no sentido de implementação de ações adaptativas, visando minimizar os riscos inerentes as consequências das mudanças climáticas e globais (socioeconômicas).

3.2 GESTÃO ADAPTATIVA E PLANEJAMENTO DE SISTEMAS HÍDRICOS

Segundo Pahl-Wostl (2007), a gestão adaptativa é um processo sistemático de melhoria contínua das políticas e práticas de gestão a partir do aprendizado com os resultados das estratégias de gestão implementadas. Essa abordagem visa a aumentar a capacidade do sistema hídrico operar sob variadas condições climáticas. Para o sucesso da gestão adaptativa, existe a necessidade de combinações de ações adaptativas, como o monitoramento dos resultados e alteração das políticas, implementadas em sistemas complexos ao longo do tempo. Nesse sentido, a gestão adaptativa se apresenta como uma solução aos problemas envolvendo a falta de informações em sistemas complexos.

Para Sayama (2015), os sistemas complexos são definidos como sendo uma rede de componentes que interagem entre si, normalmente de maneira não linear. De forma auto-organizada, esse tipo de sistema evolui, nem de forma completamente regular, nem aleatoriamente. Quando a complexidade não é bem compreendida, as interações entre

homem e natureza em sistemas complexos podem levar a surpresas. (Liu, 2007). Isto é, quanto mais se tem conhecimento das especificidades e interações entre os fenômenos desses sistemas complexos, mais se tem controle sobre as reações em cadeia que porventura podem ocorrer.

A interação dinâmica entre componentes físicos, biológicos e sociais do ciclo hidrológico faz parte do que se define como hidrocomplexidade, ou seja, complexidade inerente aos sistemas hídricos. Para Kumar (2015), existem os riscos emergentes que aparecem devido às interações imprevistas evoluindo das interdependências entre sistemas complexos, como exemplos, a alteração no tempo de recorrência de cheias e secas, alterando a disponibilidade de água, ou ainda, conflitos regionais pelo uso da água.

Com a manifestação mais acentuada da redução da disponibilidade hídrica, seja pelos conflitos de uso ou questões envolvendo qualidade da água dos mananciais, passamos a questões relacionadas à segurança hídrica.

Segundo Cook e Bakker (2012), a definição de segurança hídrica varia de acordo com o setor que utiliza a expressão. Para o setor jurídico, trata principalmente dos dispositivos legais para garantir a alocação dos recursos hídricos. Já na perspectiva agrícola, define-se como uma preocupação com a ocorrência de cheias e secas. A ANA (2024) e UNW (2013) convergem no entendimento de quando há disponibilidade de água em quantidade, ou seja, capacidade de atendimento às necessidades da comunidade, e qualidade suficientes para manter a saúde, o bem-estar e o desenvolvimento socioeconômico, existe segurança hídrica. Além disso, a capacidade de lidar com incertezas e riscos em situações extremas, como enchentes e secas, está intimamente ligada a segurança hídrica (UNW, 2013).

3.3 GESTÃO DE RISCO SOB INCERTEZAS BEM CARACTERIZADAS E PROFUNDAS

Um desafio aos responsáveis pelo planejamento e tomadas de decisões são as mudanças no clima, tecnologia, situações socioeconômicas e políticas, além das interações dinâmicas entre essas mudanças. Há a necessidade de abordagens que os auxiliem com a criação de planos de longo prazo submetidos a incertezas profundas. Por conta da presença de incertezas que não podem ser evitadas, os tomadores de decisão são alertados a buscar

decisões robustas que tenham uma performance satisfatória através da maior gama de futuros possíveis. Aceitar que as incertezas são inevitáveis nos processos de decisão de longo prazo levou ao desenvolvimento de novas abordagens e ferramentas.

As políticas de cenários adaptativos dinâmicos consomem um recurso computacional muito maior do que as políticas robustas que não levam em conta uma enorme quantidade de cenários. Essa otimização multiobjetivo explora exaustivamente os cenários desenhados. (Kwakkel *et al.*, 2016a). Quando se trata da análise de múltiplos cenários, ainda mais em períodos muito longos, existem parâmetros que podem ser extrapolados através de modelos hidrológicos ou estatísticos, os chamados de incertezas bem caracterizadas, e outros em que não se tem consenso de sua evolução com o tempo, os chamados de incertezas profundas (Lempert *et al.*, 2003). Segundo Kwakkel *et al.*, (2016b), chamá-las de incertezas profundas significa que as várias partes do processo decisório não sabem, ou não concordam, com o sistema e seus limites, seus impactos nos resultados e importância relativa.

As incertezas são intrínsecas aos processos da vida e um melhor entendimento das diferentes dimensões das incertezas e suas implicações levam a uma confiança maior no apoio a decisões, e, em consequência, melhores políticas de gestão. Entendendo melhor as diferentes dimensões das incertezas e os seus potenciais impactos nos problemas relevantes das políticas, há uma priorização das atividades de pesquisas e desenvolvimento para suporte à decisão (Walker *et al.*, 2003).

Ao se tratar de recursos hídricos, medidas de conservação de curto prazo são capazes de adiar, ou ainda, prevenir investimentos de infraestrutura. A frequência e o impacto dessas medidas são influenciados pelas trajetórias definidas no planejamento de longo prazo adotadas pelas empresas de saneamento. Ferramentas utilizadas para evitar instabilidade financeira criadas com gestões de curto prazo também devem responder às medidas combinadas entre ações de curto e longo prazos. A flexibilidade criada com a integração de sistemas produtores entre concessionárias, ou entre sistemas (adotado nesse estudo), tanto no planejamento como gerenciamento deles, podem gerar escolhas nas políticas de decisão de curto prazo (gestões de minimização de falta d'água) e as de longo prazo (desenvolvimento de infraestruturas). Se as medidas de restrição de água e transferência de água de curto prazo não refletirem em mudanças de longo prazo, o aumento da demanda por

novas infraestruturas não estará bem representada no processo de planejamento. (Zeff *et al.*, 2016).

À medida que novas informações são inseridas no ciclo de planejamento futuro, a análise de incerteza deve ser atualizada, por se tratar de um planejamento adaptativo (Kingsborough *et al.*, 2016). Assim, devem ser levados em consideração o tempo, a velocidade e a escala de implementação das diversas ações, distribuídas pelo sistema, como parte de um portfólio adaptativo e dinâmico.

3.1.1. Métodos de implementação de gestão adaptativa

Segundo Marchau *et al.* (2019), ao se tratar de gestão adaptativa, existem diversos métodos de abordagem das incertezas profundas no planejamento das tomadas de decisão. Essas decisões dependem da antecipação das mudanças. Dentre as abordagens existentes, podem-se destacar as seguintes:

- “*Robust Decision Making – RDM*” (Tomada de Decisão Robusta) – Através da simulação de múltiplos cenários, foca-se na análise de alternativa (estratégias, solução, política ou ação) que apresenta maior robustez, podendo incorporar medidas de contingência em sua implementação. Estratégias robustas são aquelas que apresentam melhor desempenho frente ao maior número de cenários analisados.
- “*Many-objective Robust Decision Making – MORDM*” (Tomada de Decisão Robusta frente a muitos objetivos) – O desempenho da alternativa é avaliado considerando-se vários objetivos.
- “*Dynamic Adaptive Planning - DAP*” (Planejamento Dinâmico Adaptativo) – Define e adota gatilhos sequenciais para mudança das políticas e especifica ações contingenciais ao longo do tempo, de modo que a política inicial não falhe.
- “*Dynamic Adaptive Policy Pathways - DAPP*” (Trajetórias de Políticas Dinâmicas e Adaptativas) – Como uma evolução do DAP, são especificados condições e prazos para as mudanças das políticas.
- “*Info-Gap Decision Theory - IG*” (Teoria das Decisões em Meio a Vazios de Informações) – Examina um conjunto de alternativas predefinidas para identificar uma mais robusta. Entretanto, não considera incertezas inesperadas, apenas as modeladas.

- “*Decision Scaling – DS*” (Escalonamento de Decisões) – Permite a incorporação de projeções de mudanças climáticas no planejamento adaptativo.

Kasprzyk *et al.* (2013), apresentam uma evolução da metodologia RDM, a chamada MORDM. Em tradução livre, seria “tomada de decisão multiobjetivo robusta” que combina conceitos e métodos de otimização evolucionários e de tomadas de decisão robustas, em conjunto com diversas análises visuais para facilitar o gerenciamento de sistemas ambientais complexos.

Autores apresentam estudos de caso com a simulação cenários, utilizando a metodologia MORDM, tanto em ambientes hipotéticos (Gold *et al.*, 2022; Trindade *et al.*, 2020), quanto em estudos de caso reais (Gold *et al.*, 2019; Gorelick *et al.*, 2022, Trindade *et al.*, 2017, Trindade *et al.*, 2019; Zeff *et al.*, 2016), que merecem atenção especial.

Um destaque para o método DS que, segundo Brown *et al.* (2019), é um método eficaz para se lidar com as incertezas, em especial, as mudanças climáticas. Através de simulações com diversos possíveis cenários climáticos, permite-se a avaliação de sensibilidade dos sistemas hídricos disponíveis.

A otimização multiobjetivo de cenários, como ferramenta exploratória de cooperação entre companhias de abastecimento, é uma forma de entender a interação entre elas e reforça como ações em cada região interferem e moldam as vulnerabilidades das demais companhias (Gold *et al.*, 2022). Assim, pode não ser necessária a utilização de uma infraestrutura própria, através da cooperação entre companhias de saneamento vizinhas (Gold *et al.*, 2019; Gold *et al.*, 2022; Gorelick *et al.*, 2022; Gorelick *et al.*, 2023), ou sistemas de produção com custos distintos, por exemplo.

Restrições como a dificuldade na implementação de novas captações incentivam políticas de cooperação entre companhias de água, como transferência de água, e até uma gestão compartilhada entre sistemas (EPA, 2017). De forma regionalizada, pode-se trabalhar com uma maior interligação entre sistemas produtores de uma mesma companhia, postergando decisões de grande impacto financeiro.

Brown *et al.* (2020) apresentam o conceito de resiliência relacionado ao projeto de sistemas hídricos, incorporando as capacidades de persistência, adaptabilidade e transformabilidade frente às incertezas futuras. A persistência permite que o sistema resista a mudanças, a adaptabilidade permite que ele se ajuste às novas condições, e a transformabilidade indica quando o sistema deve ser alterado fundamentalmente para reduzir os danos. Quando confrontados com incertezas profundas relacionadas à variabilidade climática, procura-se adaptar os sistemas e indicar quando é necessária uma transformação para minimizar os riscos.

Ao se estudar os diversos atores interessados em uma determinada bacia hidrográfica, na avaliação de robustez, vulnerabilidades e cenários, verificam-se grandes diferenças em como esses usuários na bacia são afetados tanto pelas incertezas quanto por decisões, moldando a magnitude e a frequência da escassez de diversas maneiras entre os usuários (Hadjimichael *et al.*, 2020).

Segundo Gorelick *et al.* (2023), a fim de superar desafios financeiros ou de demanda por água, acordos de cooperação entre companhias de saneamento, compartilhando infraestruturas existentes e planejando a implementação de novas soluções de forma conjunta, podem trazer um alívio a essas incertezas. Ao se tratar do compartilhamento de infraestrutura entre companhias de saneamento, Hamilton *et al.* (2022) entendem que o retorno dentro de sistemas complexos integrados, com benefícios na disponibilidade hídrica e riscos financeiros, é altamente desigual, influenciando a consolidação desses acordos. Ao se trabalhar dentro da mesma companhia com sistemas interligados, há possibilidades de eliminar esse conflito institucional, sendo o maior desafio a questão financeira.

A tomada de decisão envolvendo sistemas com grandes infraestruturas é caracterizada pela incerteza e os resultados desejados (objetivos) nem sempre possuem consenso entre gestores. Segundo Bojórquez-Tapia *et al.* (2022), embora considerável atenção tenha sido dada aos resultados e implicações de grandes investimentos em infraestrutura, pouca atenção é dada aos processos de decisão voltados à sustentabilidade da infraestrutura existente.

Trindade *et al.* (2019) constataram que o crescimento da demanda por água foi o principal fator envolvido na análise de cenários ao se avaliar a performance e robustez de sistemas urbanos de abastecimento de água na região do *Reserach Triangle* na Carolina do Norte,

EUA. Essa observação chama a atenção especial às projeções de demanda futura nas análises de cenários utilizados para planejamento de infraestruturas hídricas.

Conforme levantado, entende-se que o crescimento da demanda futura por água e grandes investimentos em sistemas produtores de água, incluindo a interligação de localidades, e permitindo múltiplas fontes de abastecimento são importantes balizadores do sucesso ou fracasso na gestão adaptativa do abastecimento de água numa região.

3.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO DE SISTEMAS HÍDRICOS

Na definição de Power (1997), sistemas de suporte a decisões é um termo que engloba os diversos sistemas de informações que auxiliam na tomada de decisões. Estes já são discutidos há mais de 50 anos e no caso da água, a medida em que se descobrem mais relações entre os componentes das bacias hidrográficas, mais se tem necessidade de ampliar o desenvolvimento desse tipo de ferramenta (Mysiak *et al.*, 2005).

Atendendo objetivos específicos, esses sistemas evoluem na forma como tratam as informações. Como exemplo, há o Acquanet, um sistema de suporte a decisões que combina a alocação de água e avaliação da qualidade da água permitindo a formulação da topologia do sistema analisado no programa (Roberto *et al.*, 2007), ou ainda, o WBalMo, um sistema de simulação interativa para a gestão de bacias hidrográficas que auxilia na elaboração de planos operacionais para na gestão dos recursos hídricos e abastecimento de usuários, além da geração de relatórios de investimentos em projetos (WASY, 2003).

Além desses, temos também o RIBASIM, desenvolvido pela Deltares, o qual é uma ferramenta avançada para simular o comportamento hidrológico em bacias hidrográficas, considerando condições hidrológicas atuais e futuras. Esta ferramenta possibilita modelar diversas opções de medidas relacionadas à gestão operacional e de infraestruturas, mudanças na distribuição de água e padrões de consumo. Ela é especialmente capaz de lidar com a vasta quantidade de dados típicos de sistemas complexos (Deltares, 2013).

Com outra abordagem, Trindade *et al.* (2020) apresentam um sistema de suporte a decisões de código aberto de simulação e otimização, o Waterpaths, que combina o gerenciamento de políticas de operação e planejamento de implantação adaptativa de infraestruturas de água.

A aplicação dessa ferramenta já foi objeto de estudo na gestão do sistema de abastecimento urbano do Distrito Federal, com a inclusão do conceito de incertezas profundas (Giacomazzo, 2020; Araújo, 2024).

Desenvolvido pela Danish Hydraulic Institute, sucedendo o MIKE BASIN, temos o MIKE HYDRO Basin como ferramenta de modelagem hidrológica e gestão de recursos hídricos. Ele permite estudos de gestão de recursos hídricos, soluções de alocação de recursos e escassez de água entre setores (indústria, agricultura, abastecimento de água etc), otimização de reservatórios de acumulação e hidroelétricas, planejamento conjunto de utilização entre mananciais subterrâneos e superficiais, além de questões relacionadas à otimização de processos de irrigação (DHI, 2023).

O WEAP, Water Evaluation and Planning System, utiliza uma abordagem integrada no planejamento de recursos hídricos, que permite a estruturação do balanço entre a demanda e a disponibilidade hídrica, incluindo transferências. As principais funcionalidades do WEAP são a análise de demandas localizadas, de conservação da água e de políticas de alocação de recursos. Após a concepção da topologia, define-se o conjunto de políticas, custos, investimento, que podem vir a interferir nas condições atuais, definidas previamente. Com base nessas definições de políticas estabelecidas, cenários são definidos para avaliação do sistema simulado (Sieber e Purkey, 2015).

Globalmente, o WEAP tem sido utilizado em diversos estudos, demonstrando sua versatilidade e aplicabilidade. Por exemplo, ele foi empregado na avaliação de níveis de segurança de curto, médio e longo prazos considerando cenários socioeconômicos e de mudança climática na bacia de Vilcanota-Urubamba, Perú (Goyburo *et al.*, 2023). Além disso, o WEAP foi usado para estudar a relação entre a demanda de água e benefícios econômicos na região de Sistan, Irã (Farrokhzadeh *et al.*, 2020), bem como nos processos de oferta e demanda de água da Universidade Nacional de Ciências e Tecnologia, Islamabad, Paquistão (Saleem *et al.*, 2021), dentre outros. Esses estudos internacionais destacam a relevância do WEAP como uma ferramenta robusta e adaptável em diversos contextos geográficos e socioeconômicos para a gestão de recursos hídricos.

No Brasil, o WEAP já foi amplamente estudado como ferramenta de suporte à decisão em diversos contextos e aplicações dentro e fora do país. Exemplos incluem a avaliação da

capacidade de satisfação de necessidades de água na região do baixo Umbeluzi, Moçambique (Notisso, 2020), a avaliação do WEAP como ferramenta de planejamento e gestão de recursos hídricos em um trecho da bacia do rio Paracatu no estado de Minas Gerais (Silva, 2019), a análise dos impactos econômicos financeiros no setor elétrico a partir da construção de cenários alternativos de operação de reservatórios (Brambilla, 2016), a avaliação de indicadores e índices relativos a sustentabilidade do Sistema hídrico da Bacia do Rio Descoberto frente a diferentes cenários (Castro, 2019), a geração de cenários de disponibilidade e qualidade no WEAP com resultados de simulação e qualidade do SWAT (Monsalve-Herrera, 2013) e a simulação hidrológica da bacia do Rio Formoso e modelagem de regras de rodízio nas bombas de captação d'água cenários em regiões de conflito pelo uso da água (Silva *et al.*, 2024), entre outros.

Além das características do próprio modelo, do ponto de vista acadêmico, no Brasil o WEAP vem sendo estudado, facilitando a troca de conhecimentos entre a comunidade científica. A possibilidade de geração de múltiplos cenários em uma interface gráfica é uma funcionalidade que auxilia na análise de robustez das soluções. Além disso, ele pode ser facilmente internalizado na operação e decisões da Caesb, uma vez que permite a representação do sistema de forma simples e com baixo requisito de dados.

3.5 O WEAP COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE

Dentre o universo de softwares de simulação, escolheu-se o WEAP por este ter um sistema de suporte à decisão que permite a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e o estabelecimento de regras de operação de reservatórios e rios de forma integrada, através do balanço hídrico entre a disponibilidade e as demandas, permitindo uma abordagem ampla na análise de cenários. Essa ferramenta se adapta ao método DS de gestão adaptativa, tendo em vista a possibilidade simulação exaustiva das variabilidades climáticas e de incerteza profunda nos cenários.

Apesar de possuir ferramentas de modelagem hidrológica como uma de suas características, essas não foram utilizadas, pois foram utilizadas as séries sintéticas de vazões afluentes e de evaporação de reservatórios geradas por Araújo (2023) a partir de registros históricos. Estas séries foram extrapoladas para elaboração de séries sintéticas (Borgomeo *et al.*, 2015).

O WEAP permite definir a topologia do sistema analisado, inserindo elementos como nós e links de transmissão. Os nós podem ser captações, interligações ou pontos de demanda. Já os links de transmissão são linhas que conectam a disponibilidade com a demanda.

Através da programação linear inteira mista (MILP), o WEAP maximiza a satisfação de atendimento entre pontos de demanda, enchimento de reservatórios, vazões especificadas pelo usuário e energia hidrelétrica. Estes são resolvidos simultaneamente e estão sujeitos à prioridades de demanda, priorização de atendimento, balanço de massa e restrições impostas.

O WEAP faz o balanço de massa de cada nó ou link do sistema a um passo de tempo mensal, ou seja, volumes mensais acumulados de entrada e demanda. As demandas são atendidas de acordo com as suas prioridades, preferências de mananciais, balanço de massa e restrições (WEAP, 2023).

Dadas as restrições e priorizações estabelecidas no modelo do WEAP, o balanço de massa estabelecido nos pontos principais do modelo é estabelecido conforme as equações descritas na sequência, partindo-se dos mananciais até os pontos de demanda.

As condições de operação dos reservatórios são influenciadas pelos volumes mensais afluentes e de evaporação inseridas no modelo. Assim, temos as equações para cada condição: inicial (3.1) e dos meses subsequentes dos reservatórios (3.2).

$$\textit{Reserva\c{c}\~{a}o mensa}l_m = \textit{Reserva\c{c}\~{a}o inicial para } m = 1 \quad (3.1)$$

$$\textit{Reserva\c{c}\~{a}o mensa}l_m = \textit{Reserva\c{c}\~{a}o final}_{m-1} \textit{ para } m > 1 \quad (3.2)$$

A cota inicial do reservatório é calculada em função da curva Volume-Elevação inserida para o reservatório, dada a Reservação mensal inicial estabelecida para o modelo, dadas equação (3.3).

$$\begin{aligned} &\textit{Eleva\c{c}\~{a}o mensa}l \textit{ inicial}_m \\ &= \textit{VolumeParaEleva\c{c}\~{a}o}(\textit{Reserva\c{c}\~{a}o mensa}l \textit{ inicial}_m) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Dado o decréscimo da cota do reservatório em função da evaporação, ajusta-se a elevação a esse desconto, conforme equação (3.4).

$$\begin{aligned} \text{Elevação mensal inicial ajustada}_m \\ = \text{Elevação mensal inicial}_m - \text{Evaporação}_m \end{aligned} \quad (3.4)$$

Assim, com a cota ajustada, através da curva de Volume-Elevação, tem-se o volume de reservação ajustado através da equação (3.5).

$$\begin{aligned} \text{Reservação mensal inicial ajustada}_m \\ = \text{ElevaçãoParaVolume}(\text{Elevação mensal inicial ajustada}_m) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Tem-se a Reservação de Operação como o volume disponibilizado pelo reservatório para ser utilizado a cada passo de tempo. Essa reservação é o volume de água entre a cota de ajustada e alguma cota definida na concepção dos limites operacionais do reservatório. Considerou-se como Reservação de Operação o volume mensal ajustado somado aos volumes afluentes ao reservatório, exemplificada na equação (3.6).

$$\begin{aligned} \text{Reservação de Operação}_m \\ = \text{Reservação mensal inicial ajustada}_m \\ + \text{Afluente Reservatório}_m \end{aligned} \quad (3.6)$$

O reservatório só irá disponibilizar água para a demanda à jusante enquanto a Elevação mensal inicial for superior, ou igual, a cota definida como limite operacional do respectivo reservatório, ou Elevação Operacional. Caso o reservatório chegue nesse limite, cessa-se a disponibilização de água à estação de tratamento, contabilizando-se uma falha no reservatório. A Figura 3.3 apresenta essa delimitação.



Figura 3.3 – Representação da operação dos reservatórios de acumulação no WEAP.

De acordo com as equações (3.7) e (3.8), o volume Efluente ao Reservatório será sempre o somatório de todos os links de transmissão de saída, e menor ou igual à Reservação de Operação.

$$Efluente\ Reservatório_m = \sum_{i=1}^n Volume\ de\ Saída_{Link\ de\ transmissão,n} \quad (3.7)$$

$$Efluente\ Reservatório_m \leq Reservação\ de\ Operação_m \quad (3.8)$$

Por fim, como mostrado na equação (3.9), a reservação no final de cada ciclo mensal de reservação será sempre menor ou igual à Reservação de Operação descontado do Volume Efluente do Reservatório.

$$\begin{aligned} Reservação\ mensal\ final_m \\ \leq Reservação\ de\ Operação_m \\ - Efluente\ Reservatório_m \end{aligned} \quad (3.9)$$

A cada passo de tempo, cada ponto de demanda recebe a soma dos volumes transferidos através dos links de transmissão, vide equação (3.10), onde o volume recebido em cada ponto de demanda sempre será inferior, ou igual, a capacidade de fornecimento, conforme equação (3.11).

$$\begin{aligned}
& \text{Volume de Entrada}_{\text{Ponto de Demanda}} \\
& = \sum_{i=1}^n \text{Volume de Saída}_{\text{Link de transmissão},n}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Volume de Entrada}_{\text{Ponto de Demanda}} \\
& \leq \text{Capacidade de fornecimento}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Entre um ponto e outro do sistema, temos os links de transmissão. Não foram contabilizadas as perdas de rede nos links de transmissão, assim, o volume de saída é igual ao volume de entrada do link. Esses trechos podem ter a suas vazões limitadas de forma a reproduzir restrições de outorga, capacidade de produção, ou ainda, condições hidráulicas. As equações (3.12) e (3.13) representam essas duas condições.

$$\begin{aligned}
& \text{Volume de Saída}_{\text{Link de transmissão}} \\
& = \text{Volume de Entrada}_{\text{Link de transmissão}}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Volume de Entrada}_{\text{Link de transmissão}} \\
& \leq \text{Volume Restritivo}_{\text{Link de transmissão}}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

E finalmente, temos os pontos de demanda que mobilizam todo o sistema desde o manancial. Nesse estudo, os pontos de demanda foram caracterizados de duas formas:

- a) *Área de Serviço*: Representação pontual de um conjunto delimitado de consumidores de água. Ao consumo médio estabelecido, foram definidos padrões de crescimento;
- b) *Vazão remanescente*: Vazão remanescente (L/s) a ser atendida na operação do reservatório pela outorga de uso da captação do manancial.

A cada passo de tempo os pontos de demanda solicitam um volume para ser atendido. Dentro do limite do link de transmissão, caso não se atinja nenhuma das restrições impostas, é realizado esse atendimento. O volume utilizado é descontado do reservatório e se prossegue a simulação.

De forma simplificada, foram utilizados 3 elementos principais no WEAP: Reservatório de acumulação, link de transmissão e ponto de demanda. Na ausência de um elemento específico para Estações de Tratamento de Água, utilizou-se o reservatório de acumulação com capacidade de reservação nula.

4 METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos do presente trabalho, apresenta-se a seguir a metodologia geral distribuída em quatro etapas, representada na Figura 4.1.

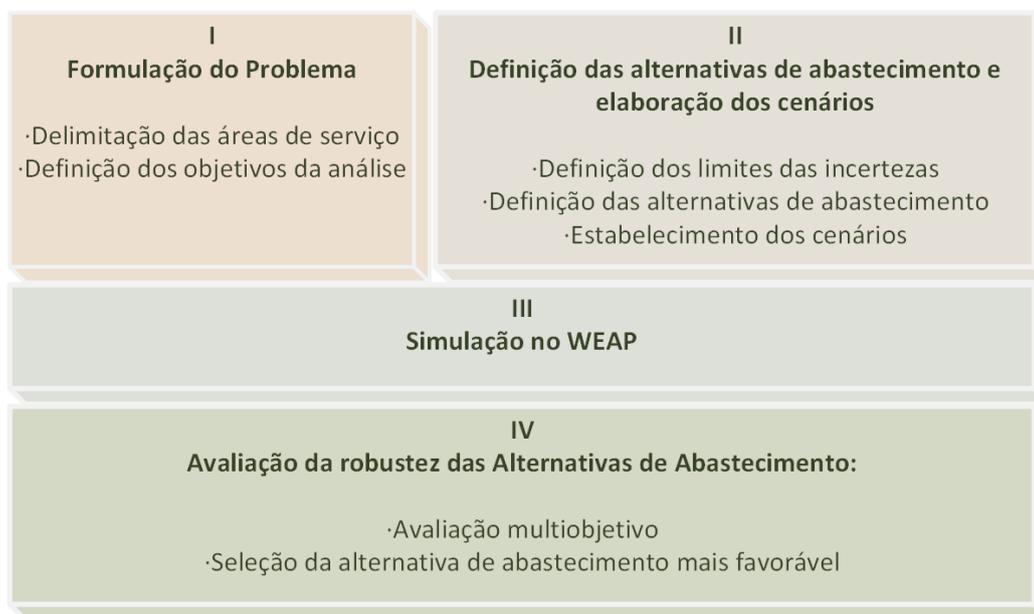


Figura 4.1 - Diagrama geral da metodologia.

A seguir, cada uma dessas etapas será detalhada em suas atividades específicas.

4.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O presente trabalho apresenta uma metodologia aplicável não somente ao Sistema Produtor de Água do Distrito Federal, mas a qualquer outro sistema de abastecimento com subsistemas integrados.

Desse modo, apresentaram-se os passos da metodologia de forma ampla, sendo pormenorizadas no item 5 - Estudo de Caso Aplicado ao Distrito Federal.

4.1.1 Delimitação das áreas de serviço

A partir da necessidade detectada de se comparar condições diferenciadas de operação em um sistema de distribuição de água de determinada localidade, inicialmente, deve-se

delimitar essas regiões. Essas regiões delimitadas e interligadas são as chamadas de Áreas de Serviço (AS). Para essas áreas, deve-se atender, ao menos, os seguintes requisitos:

- a) Limites das áreas conhecidas, tanto os geográficos, quanto a das redes implantadas. Essa condição é necessária, pois após a consolidação de todos os dados, elas serão consideradas pontos de demanda de água, podendo envolver mais de uma interligação com as fontes de produção;
- b) Fontes de abastecimento conhecidos, sejam elas, uma ou mais unidades de tratamento. Devem ser definidas quais as unidades de tratamento responsáveis pelo abastecimento da AS, ou ainda, quais as possibilidades de atendimento por uma ou por outra unidade de tratamento;
- c) População estimada de cada região. Essa informação é essencial, pois a demanda de cada AS é calculada sobre essa informação.

É importante se ter conhecimento dos limites de alcance do abastecimento de água, incluindo as unidades produtoras de água e da população das áreas de serviço, pois esse conjunto de informações é o núcleo da problemática que está sob estudo.

Com essas três informações é possível dar sequência às próximas etapas da metodologia.

4.1.2 Definição dos objetivos da análise

Na metodologia proposta, busca-se comparar condições operacionais distintas de abastecimento, envolvendo as incertezas profundas (IP) e bem caracterizadas (IBC) inerentes às condições futuras. Para as IPs, temos a avaliação do aumento de demanda e dos efeitos imediatos da redução de perdas reais na disponibilidade hídrica. Como IBC, temos as múltiplas condições climáticas futuras.

Devem ser bem claros quais as configurações operacionais do sistema que se pretende analisar, motivo pelo qual se faz necessário o entendimento da dinâmica do sistema e como as interligações entre as unidades de tratamento e as áreas de serviço interagem.

4.2 DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO E ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS

4.2.1 Definição dos limites das incertezas

Como mencionado anteriormente, foram inseridas as incertezas profundas no problema: o crescimento da demanda e a redução de perdas. Pela característica já exposta na revisão bibliográfica, não se tem consenso no estabelecimento de seus limites. Desse modo, buscou-se estratificar esses parâmetros e criar uma malha de possibilidades que serão tratadas na avaliação multiobjetivo dos resultados.

Ao se tratar das condições climáticas, propõe-se a utilização do maior número possível de séries sintéticas (e aleatórias) de vazão e evaporação para o período da simulação. Quanto maior a variabilidade das séries, aumenta-se a probabilidade de em determinado momento, alguma das séries se aproximar dos valores reais, ou observados. Assim, todos os critérios serão testados em diversas condições climáticas simuladas, explorando ao máximo as possíveis situações futuras.

Para projetar o crescimento da demanda ao longo de um período tão extenso, torna-se desafiador estabelecer uma taxa fixa de crescimento anual única da população. Pode ser utilizada uma taxa de crescimento compatível com o valor esperado, ou seja, a média do crescimento de anos anteriores, ou ainda, algum estudo técnico realizado por uma entidade confiável. Com a taxa definida, deve-se estabelecer limites mínimos e máximos, ampliando a faixa de variação apresentada, desenvolvendo-se uma malha de possibilidades em torno desse valor.

A definição dessas faixas e a aplicação prática dessa conceituação geral tornam-se mais claras na apresentação do estudo de caso.

4.2.2 Definição das alternativas de abastecimento

Através da abertura e fechamento de válvulas do sistema de distribuição de água, conhecidas como manobras operacionais, é possível alternar o abastecimento de determinadas áreas de

serviço, de forma que uma área tenha múltiplas possibilidades de atendimento por determinado sistema produtor.

Quando da definição das áreas de serviço, é esperado que a operação da rede já seja compreendida, pois irá impactar no detalhamento da integração entre elas. Nesse ponto, devem ser definidas quantas combinações possíveis e em quais sentidos o abastecimento irá ocorrer.

Conhecidas as interações entre as Áreas de Serviço e possibilidades abastecimento por uma ou mais, discriminam-se as alternativas de abastecimento do sistema. Essas condições representam a configuração do sistema produtor de água que serão avaliados durante a simulação.

É nessa etapa em que deve ser desenvolvido no WEAP, o modelo esquemático de integração entre as infraestruturas da companhia e sistema hídrico, como estações de tratamento de água, rios e reservatórios de acumulação. Esse modelo será o mesmo para todos os cenários criados, diferenciando-se pelos critérios que devem ser adaptadas para cada situação.

O WEAP permite que interligações entre a unidade de tratamento e a área de serviço sejam desabilitadas, ou restringidas. Dessa forma, restringindo um trecho e habilitando outro, criam-se alternativas de abastecimento diferenciadas.

4.2.3 Elaboração do conjunto de cenários

Nessa metodologia, é importante o entendimento adequado da diferenciação entre cenário e alternativa de abastecimento. A alternativa de abastecimento é a forma como o sistema está habilitado para operar, diferenciando-se pelo sentido e restrições de abastecimento. Cada alternativa de abastecimento deve ser uma configuração de operação do sistema, passível de implantação pela companhia de saneamento. Já o cenário é uma das opções de comportamento de determinada alternativa de abastecimento, incorporando as incertezas. Então, existem infinitos cenários para uma determinada alternativa de abastecimento, motivo pelo qual se opta pela estratificação dos parâmetros de incerteza profunda.

Após a definição das alternativas de abastecimento, caracteriza-se cada cenário pertencente à essa alternativa. A cada cenário é imposto uma taxa de crescimento populacional e um percentual de redução nas perdas. De acordo com a estratificação dessas características, tem-se uma malha de comportamentos impostos a alternativa de abastecimento. A equação (4.1) representa a quantidade total de cenários. Como cada cenário é simulado sob condições climáticas diferentes, teremos a equação (4.2), que representa o total de simulações.

$$N_{Cenários} = N_{Alternativas} \times N_{Crescimento} \times N_{Perdas} \quad (4.1)$$

$$N_{Simulações} = N_{Cenários} \times n \quad (4.2)$$

Em que:

$N_{Cenários}$ = Número total de cenários;

$N_{Alternativas}$ = Número de alternativas de abastecimento;

$N_{Crescimento}$ = Quantidade de taxas de crescimento populacional;

N_{Perdas} = Quantidade de opções de redução de perdas;

$N_{Simulações}$ = Número total de simulações;

n = número de séries de condições climáticas.

O número de alternativas $N_{Alternativas}$ é a quantidade definida de configurações de abastecimento possíveis através da abertura e fechamento de válvulas da rede de abastecimento de água, utilizando-se a infraestrutura existente.

4.3 SIMULAÇÃO NO WEAP

A simulação, como etapa seguinte a elaboração dos cenários, ao passo de tempo mensal, de acordo com o balanço hídrico descrito em 3.5, representa o processo de captação e distribuição de água às áreas de serviço.

No WEAP, cada arquivo criado é um cenário específico, sendo necessária a criação de $N_{Cenários}$ arquivos, conforme definido na equação (4.1). A seguir, são apresentados os dados requeridos pelo WEAP como entrada na criação de cada cenário e desenvolvimento da metodologia:

- Séries de vazões afluentes: internamente a cada cenário devem ser inseridas todas as séries sintéticas através de arquivos distintos;
- Séries de evaporação: de forma análoga às séries de vazões afluentes, devem ser inseridas todas as séries de evaporação dos reservatórios de acumulação;
- Curvas de armazenamento dos reservatórios: deve ser preenchido o campo específico com as informações de cota e volume de todos os reservatórios de acumulação;
- População do ano base: cada área de serviço deve ser alimentada com a população em seu ano base. As projeções de crescimento serão aplicadas nos anos das projeções das séries sintéticas;
- Taxa de crescimento da demanda: refere-se a taxa de crescimento anual da população para ser adotada em cada cenário;
- Demanda anual da área de serviço: a demanda per capita de cada área de serviço é uma informação fixa, calculada em função da população e da produção atual para atendimento da AS. Entretanto, o consumo da AS aumenta no decorrer da simulação, pois a taxa de crescimento é aplicada sobre a população. Para o caso de demandas constantes, como exemplo, vazão remanescente, não se aplica nenhuma taxa de crescimento;
- Limites do reservatório: é necessário inserir as cotas máximas e mínimas de operação dos reservatórios de acumulação;
- Capacidade atual de reservação: deve-se inserir o volume inicial de reservação para início da simulação, no ano base;
- Limitação e priorização dos links de transmissão: durante a criação das conexões entre as unidades de tratamento e as áreas de serviço, devem ser definidas as restrições de vazão ou priorização de um manancial em favor de outro, caso haja interesse.

Após a criação de cada cenário, deve-se executar a simulação. De acordo com a estrutura de arquivos elaborada, é necessária a utilização de um *script* no WEAP para a execução da simulação dos cenários e cálculo dos resultados, ver Apêndice C - Scripts. Esses *scripts* para análise dos resultados foram elaborados em linguagem de programação R e os internos no WEAP utilizaram a linguagem VBScript. Quanto maior a quantidade de alternativas de abastecimento definidas, maior a necessidade da utilização do *script*.

Internamente, o WEAP registra os resultados e possui uma configuração própria para os gráficos, mas a forma com que as tabelas são apresentadas não é a adequada para a análise posterior. Dada a elevada quantidade de cenários, a exportação manual dos resultados é inviável, motivo pelo qual também se fez necessária a execução de um *script* para a exportação de resultados de todos os cenários executados.

4.4 AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ DAS ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO

4.4.1 Avaliação Multiobjetivo dos Resultados

Para a avaliação multiobjetivo dos resultados, também se faz uso de um *script* para coletar os resultados dos cenários para tratamento e análise no R. São exportados os resultados referentes ao volume total demandado e volume não atendido pelas áreas de serviço, volumes produzidos pelas ETAs e volume de reservação dos reservatórios de acumulação. Os resultados são exportados nos formatos “csv”, valores separados por vírgulas, e são fontes de dados para o cálculo dos indicadores que serão avaliados na análise multiobjetivo dos resultados.

Para o tratamento desses arquivos foi utilizada a linguagem de programação R. Nele são extraídos os dados, calculados os objetivos e gerados todos os gráficos que servirão para análise visual.

A partir dos resultados obtidos na simulação, são calculados indicadores de cada simulação, sendo eles de consumo de energia elétrica, intensidade de falhas no atendimento às áreas de serviço e quantificação das falhas nos reservatórios de acumulação. Esses indicadores serão utilizados na avaliação multiobjetivo.

4.4.1.1 Consumo de energia elétrica

O objetivo de consumo de energia elétrica envolve o consumo de energia elétrica para se produzir água tratada nas respectivas Estação de Tratamento de Água (ETA), em kWh, gasto

durante todo o período simulado. Como cada ETA possui um consumo energético diferente para entregar água ao sistema, é contabilizada toda a sua contribuição para o cálculo desse objetivo. O consumo deve ser considerado desde a captação até a saída da estação de tratamento para distribuição. A equação (4.3) representa o cálculo desse indicador.

$$C_{Total} = CR_i \sum_{t=1}^n P_{ETA_i,t} + \dots + CR_m \sum_{t=1}^n P_{ETA_m,t}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.3)$$

Em que:

C_{Total} = Consumo total de energia elétrica da simulação, em kWh;

CR = Consumo relativo de produção da unidade de tratamento, incluindo as estações elevatórias, em kWh/m³;

P_{ETA} = Volume produzido pela unidade de tratamento, em m³;

n = Tempo da simulação, em anos;

m = Número de ETAs.

4.4.1.2 Intensidade de falha de atendimento

O cálculo do objetivo de intensidade de falha de atendimento trata da relação entre a quantidade de água não atendida pela quantidade solicitada pelas áreas de serviço. O objetivo de cada simulação é expresso conforme a equação (4.4).

$$I_{Falhas} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{DNA_t}{D_t} \quad (4.4)$$

Em que:

I_{Falhas} = Intensidade de falhas de atendimento à demanda, adimensional;

DNA = Volume de demanda não atendida, em m³;

D = Volume demandado pelas áreas de serviço, em m³;

n = Tempo da simulação, em anos.

4.4.1.3 Falha de reservação

O objetivo de falha de reservação representa a contagem da quantidade de meses em que houve falha na operação de algum dos reservatórios de acumulação. Quando o nível do reservatório atinge um valor inferior ao estabelecido como limite operacional, é realizada a contagem do respectivo mês. A equação (4.5) representa essa definição, onde, através da função indicadora, são contabilizados os números de meses em que esse limite é atingido.

$$F_{total} = \sum_{t=1}^m \sum_{t=1}^n I(EA_{R_i,t} \leq EO_{R_i}), \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.5)$$

Em que:

EA_R = Elevação ajustada do reservatório, em metros;

EO_R = Elevação operacional do reservatório, em metros;

F_{Total} = Quantidade de falhas de todos os reservatórios, adimensional;

n = Tempo da simulação, em meses;

m = Número de reservatórios.

4.4.2 Seleção da alternativa de abastecimento mais favorável

Cada simulação pertence a alguma alternativa de abastecimento, então, ao serem estabelecidos limites de desempenho para os objetivos, é possível avaliar o enquadramento de cada alternativa dentro desses limites.

Essa metodologia sugere que como critério de desempenho, sejam utilizadas as médias dos objetivos de intensidade de falha de atendimento, consumo de energia elétrica e falha nos reservatórios de acumulação como limites para a seleção das simulações, conforme equações (4.6), (4.7) e (4.8).

$$L_{Falhas} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{Falhas,n} \quad (4.6)$$

$$L_{Energia} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{Total,n} \quad (4.7)$$

$$L_{Reserva\c{c}ao} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{Total,n} \quad (4.8)$$

Em que:

L_{Falhas} = Limite do objetivo de falhas de atendimento à demanda;

$L_{Energia}$ = Limite do objetivo de consumo de energia elétrica;

$L_{Reserva\c{c}ao}$ = Limite do objetivo de falhas dos reservatórios de acumulação;

I_{Falhas} = Objetivo de falhas de atendimento à demanda;

C_{Total} = Objetivo de consumo de energia elétrica;

F_{Total} = Objetivo de falhas dos reservatórios de acumulação;

n = Número de simulações;

Desse modo, as simulações que apresentarem resultados para os objetivos com valores inferiores ao critério estabelecido, serão selecionados. É possível verificar quais as simulações e, conseqüentemente, quais as alternativas de abastecimento cada uma se refere. Assim, a alternativa de abastecimento que apresentar maior recorrência, ou seja, maior quantidade de simulações com resultados abaixo do critério de desempenho, será o selecionado como mais favorável.

5 ESTUDO DE CASO APLICADO AO DISTRITO FEDERAL

O presente estudo abrange as regiões do Distrito federal, abastecidos pelo Sistema Produtor de Água do Distrito Federal, além da contribuição da água produzida fora dos limites do Distrito Federal, no estado de Goiás, pelo Sistema Corumbá. Essa área de estudo é apresentada no mapa de localização na Figura 5.1.

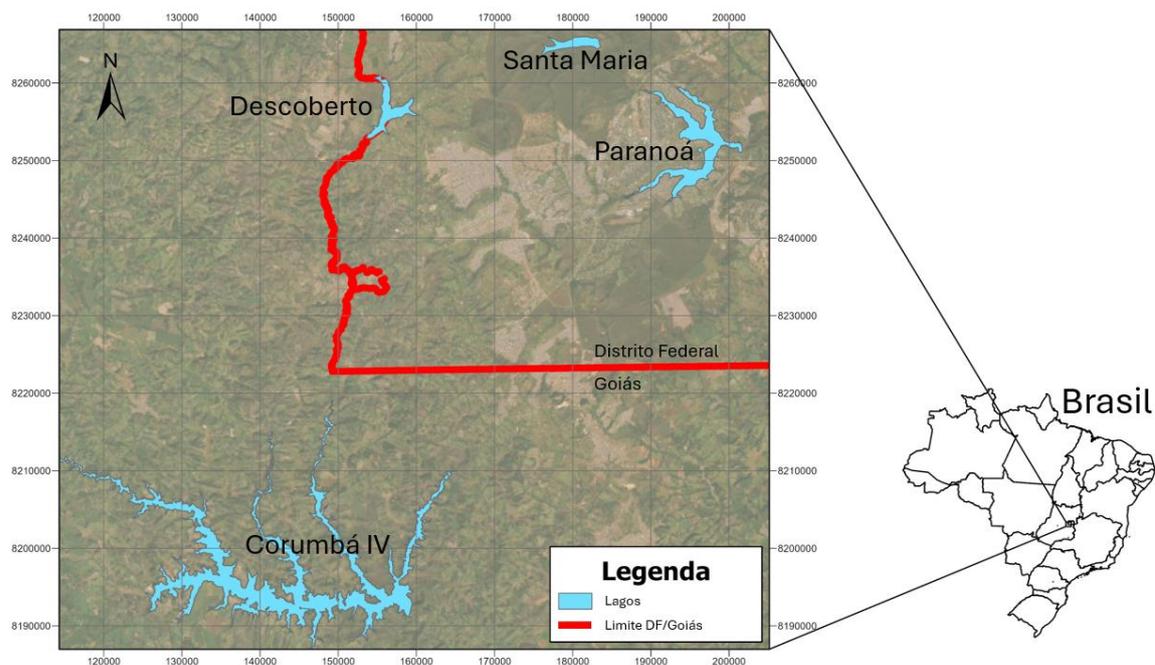


Figura 5.1 - Mapa de localização dos lagos de acumulação e representação dos limites do Distrito Federal com o estado de Goiás.

A produção de água que atende a população do Distrito Federal, atualmente, caracteriza-se por grandes subsistemas interligados ou isolados. Dentre eles, os Sistemas Descoberto, Torto/Maria/Paranoá, Sobradinho/Planaltina, São Sebastião, Brazlândia, Rural, e mais recentemente, o Sistema Corumbá.

Com dados de 2022, início da operação da ETA Corumbá, representou-se a contribuição média de cada sistema na produção total de água para o Distrito Federal, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Distribuição percentual da produção de água no Distrito Federal em 2022 pela Caesb.

Sistema Produtor	Vazão Média¹ (l/s)	Percentual (%)
Descoberto	3.916	48
Torto/Santa Maria/Paranoá	2.804	34
Sobradinho/Planaltina	688	8
São Sebastião	225	3
Brazlândia	114	1
Rural	72	1
Corumbá*	399	5

*Dados de setembro à dezembro de 2022.

A produção das Estações de Tratamento de Água (ETAs) representa cerca de 93% de toda a produção de água produzida para o DF. De forma didática, as ETAs são organizadas em grandes sistemas produtores. Com isso, na Tabela 5.2, apresentam-se as captações e respectivas unidades de tratamento pertencentes a cada sistema:

Tabela 5.2 - Sistemas produtores de água operados pela Caesb, suas captações e unidades de tratamento (ETAs).

Sistema Produtor	Captações Superficiais	Unidades de Tratamento
Descoberto	Descoberto; Alagado e Crispim; Engenho das Lages	ETA Rio Descoberto ETA Gama ETA Engenho das Lages
Torto/ Santa Maria/ Paranoá	Torto, Santa Maria e Bananal; Lago Paranoá; Cabeça do Veado	ETA Brasília ETA Lago Norte ETA Lago Sul
Sobradinho/ Planaltina	Fumal, Brejinho e Pipiripau; Paranoazinho e Contagem;	ETA Pipiripau ETA Contagem

¹ Informação técnica obtida junto a área de produção de água da Caesb.

	Mestre D'armas e Corguinho; Quinze	ETA Planaltina ETA Vale do Amanhecer
Brazlândia	Barroco e Capão da Onça	ETA Brazlândia
Corumbá	Lago Corumbá	ETA Corumbá

Cabe ressaltar que existem ETAs que mesmo formalmente pertencendo a um grande sistema, operam de forma isolada, não sendo interligadas através da rede de distribuição ao grande sistema, como o caso da ETA Engenho das Lages.

Os Sistemas Descoberto, Torto/ Santa Maria/ Paranoá, Sobradinho/ Planaltina e São Sebastião possuem interligações que permitem a transferência de água entre áreas antes abastecidas, apenas, por um sistema. Entretanto, essa transferência serve apenas como complementação, pois não supre as demandas de nenhum sistema em sua totalidade. A interligação mais notável entre os sistemas é conhecida como “Adutora Reversível”, que através de manobras da rede de abastecimento, permitem a transferência de água entre os sistemas Descoberto e Torto/ Santa Maria/ Paranoá, nos dois sentidos. Atualmente, a contribuição do Sistema Torto/Santa Maria avança sobre áreas anteriormente abastecidas pelo Sistema Descoberto.

Através das interligações entre algumas regiões, há a possibilidade de atendimento por mais de um sistema produtor.

O presente estudo trata de um recorte da integração entre os principais sistemas produtores. Foram selecionadas as maiores estações de tratamento para serem analisadas em conjunto, e consequentemente, em suas áreas de atendimento.

5.1 DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE SERVIÇO

O Distrito Federal é dividido em 35 regiões administrativas, cujos limites físicos definem a jurisdição da ação governamental para fins de descentralização administrativa e coordenação dos serviços públicos (GDF, 2024). As Regiões Administrativas (RAs) do Distrito Federal foram agrupadas em áreas de serviço. Definiu-se como área de serviço uma região delimitável, onde se pode atribuir a produção e o consumo de água em determinado período.

Nesse trabalho, cada área de serviço representa o conjunto de RAs abastecidas em sua totalidade, ou predominantemente, por um Sistema Produtor específico. A flexibilidade no atendimento por mais de um sistema produtor de água em determinadas RAs foram levadas em consideração nessa delimitação, sendo as áreas de serviço segmentadas abaixo:

- Área de serviço 1: Guará;
- Área de serviço 2: Candangolândia e Núcleo Bandeirante;
- Área de serviço 3: Recanto das Emas, Gama, Parkway, Santa Maria e Riacho Fundo II;
- Área de serviço exclusiva 1: Taguatinga, Ceilândia, Samambaia, Riacho Fundo I, Águas Claras, Vicente Pires, Arniqueira, Sol Nascente/Pôr do Sol. Estas RAs abastecidas pelo Sistema Descoberto;
- Área de serviço exclusiva 2: Brasília, Cruzeiro, Lago Sul, Lago Norte, Sudoeste/Octogonal, Varjão, SIA, SCIA, Jardim Botânico, Paranoá e Itapoã. Estas RAs são atendidas pelo Sistema Torto/ Santa Maria/ Paranoá;
- Área de serviço exclusiva 3: Planaltina, Sobradinho I, Sobradinho II e Fercal. RAs abastecidas pelo Sistema Sobradinho/ Planaltina.

Na Figura 5.2, apresenta-se a integração entre as unidades de tratamento de água e às áreas de serviço definidas.

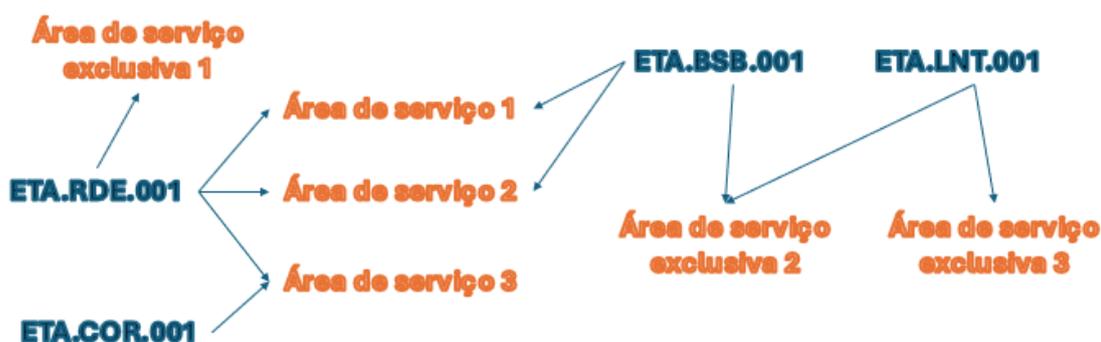


Figura 5.2 - Representação da integração entre as áreas de serviço.

5.2 DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS DE ABASTECIMENTO

Neste trabalho, as áreas de serviço 1, 2 e 3 possuem a possibilidade de alternância de fontes de abastecimento.

Desde 2022, quando o Sistema Corumbá se integrou ao sistema de distribuição de água do Distrito Federal, fez-se possível o abastecimento das RAs Recanto das Emas, Gama, Parkway, Santa Maria e Riacho Fundo II com a água da ETA Corumbá, além da água da ETA Rio Descoberto. Essa alternativa operacional permitiu a redução da dependência dessas regiões de apenas um sistema produtor. Anteriormente estas regiões eram abastecidas exclusivamente com a água da ETA Rio Descoberto.

Na Figura 5.3 é representada a integração da água produzida pela ETA.COR.001 no abastecimento do Distrito Federal que se dá com a adução até o reservatório de equalização REQ.GAM.001, permitindo o abastecimento da Área de Serviço 3.

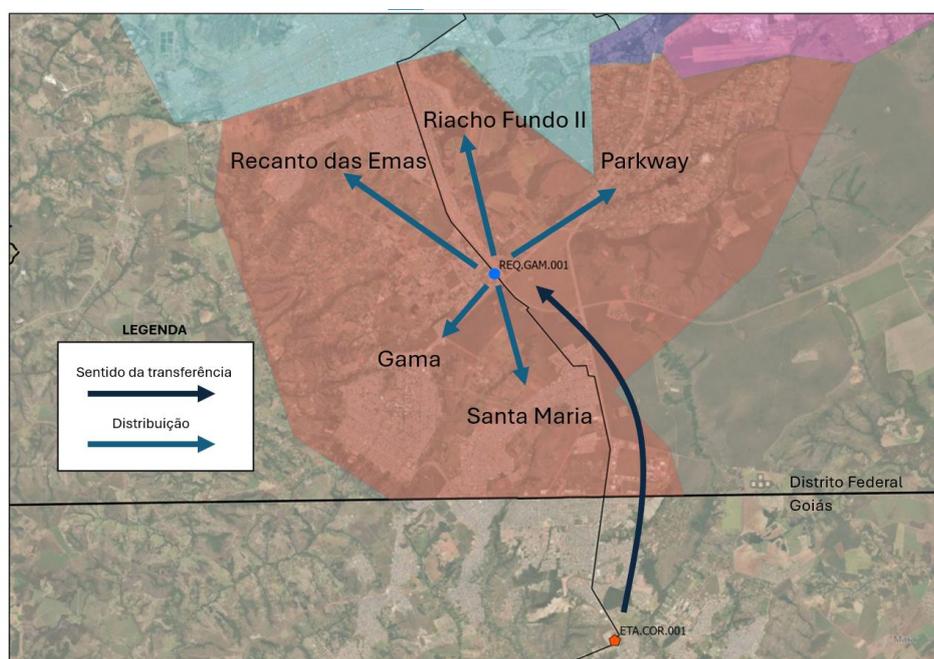


Figura 5.3 - Ponto de integração da água da ETA.COR.001 no Distrito Federal.

Como a interface entre as áreas atendidas pela ETA.BSB.001 e a ETA.RDE.001 é mais sensível do ponto de vista operacional, definiram-se 3 alternativas de abastecimento para

todo o sistema, conforme representado na Figura 5.4. A amplitude de atendimento de cada estação de tratamento de água depende da interligação da rede e da execução de manobras operacionais que criam essas 3 condições distintas de abastecimento.

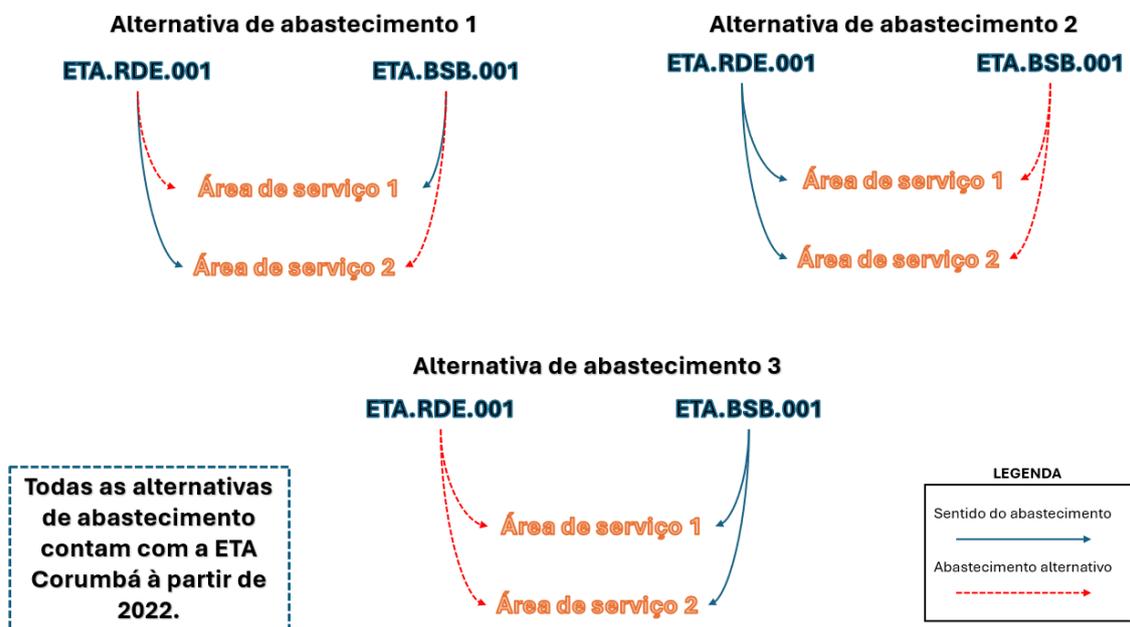


Figura 5.4 - Representação esquemática das alternativas de abastecimento.

Na alternativa de abastecimento 1, a ETA.BSB.001 abastece a Área de Serviço 1, enquanto a ETA.RDE.001 abastece a Área de Serviço 2. Se a ETA.RDE.001 atender a Área de Serviço 1, necessariamente a Área de Serviço 2 será abastecida, representada pela alternativa de abastecimento 2. Já na alternativa de abastecimento 3, a ETA.BSB.001 abastece as Áreas de Serviço 1 e 2. A alternativa de abastecimento 1 é a que se encontra em operação em 2024.

Consideraram-se estáticas as alternativas de abastecimento ao longo de cada período simulado. Essa definição apresenta a limitação de não incorporar novas infraestruturas ao sistema produtor, que porventura podem ocorrer. Entretanto, permite-se avaliar o limite de cada alternativa de abastecimento.

5.3 ELABORAÇÃO DO CONJUNTO DE CENÁRIOS

A fim de abranger uma gama de múltiplas possibilidades futuras, foram elaborados diversos cenários com variados crescimentos da demanda e condições de redução de perdas reais.

Essas variações foram aplicadas de forma escalonada nas 3 alternativas de abastecimentos definidas inicialmente.

Para as mesmas alternativas de abastecimento, foram estabelecidos crescimentos de demanda diferentes, variando de 1% a 2% ao ano, motivado pelo estudo descrito no item 5.3.6, e reduções de demanda, através de políticas com redução de perdas na ordem de 0 a 10%, conforme Tabela 5.3. A discriminação de cada cenário pode ser verificada no Apêndice B - Cenários simulados.

Tabela 5.3 - Listagem de cenários formados a partir da combinação de alternativa de abastecimento e incertezas profundas (crescimento de demanda e redução de perdas).

Código de cenários	Alternativas de Abastecimento	Crescimento demanda	Redução de perdas
1 - 36	Alternativa 1	1,0%	0
		1,2%	2%
37 - 72	Alternativa 2	1,4%	4%
		1,6%	6%
73 - 108	Alternativa 3	1,8%	8%
		2,0%	10%

Assim, foram criados 36 cenários para cada alternativa de abastecimento, totalizando 108 cenários diferentes, apresentados visualmente na Figura 5.5.

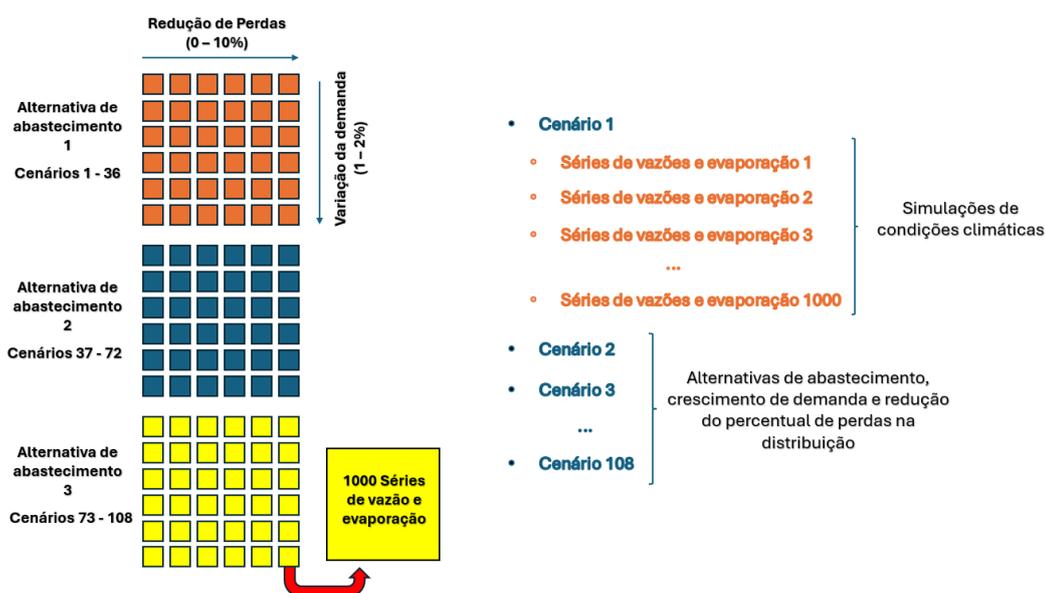


Figura 5.5 – Alternativas de abastecimento e composição dos cenários.

Na Figura 5.5, os cenários são representados como blocos de informações, onde cada um possui um patamar de crescimento populacional de redução de perda real definido, impactando na demanda por água e na disponibilidade hídrica do sistema, respectivamente.

As séries de vazões dos afluentes aos reservatórios do Descoberto, Santa Maria, Paranoá, Corumbá e captações a fio d'água do Ribeirão do Torto e Bananal, foram definidas por Araújo (2023), que através da avaliação histórica de dados, gerou 1000 séries sintéticas aleatórias de vazões e evaporação dos reservatórios para o período futuro de 40 anos, 2021 a 2060. As séries climáticas geradas representam a variabilidade das condições climáticas no horizonte de tempo considerado.

Para cada cenário foram atribuídos esses 1.000 conjuntos de séries sintéticas. Assim, foram estabelecidas 108.000 possibilidades de simulação para análise. Com isso, permitiu-se comparar as alternativas de abastecimento e avaliar o comportamento do sistema nessas diferentes combinações.

A parte prática da criação dos cenários contou com etapas manuais e automatizadas, realizadas através do módulo de edição de *scripts* interno do WEAP, o *script editor*. Inicialmente, criou-se um arquivo base, ao qual, através de um script, foram inseridas as 1.000 séries de vazão e evaporação nesse arquivo. Em seguida, replicou-se manualmente o restante dos cenários com essas mesmas informações.

5.3.1 Representação dos Sistemas Produtores

Nesse estudo estão sendo avaliados os grandes sistemas interligados, utilizando-se a área de abastecimento do Sistema Torto/Santa Maria/Paranoá, onde as principais contribuições são a ETA.BSB.001 e a ETA.LNT.001, e a área do Sistema Descoberto, com a ETA.RDE.001 como maior contribuição. A transferência de água da ETA.LNT.001 para área de serviço exclusiva 3 é limitada pela infraestrutura instalada, não pelas demandas das áreas propriamente ditas.

Assim, através da representação real da integração entre os sistemas Figura 5.6, foi elaborado um modelo simplificado da interligação entre os sistemas para ser aplicado no WEAP, com possibilidades de alternância de abastecimento Figura 5.7.

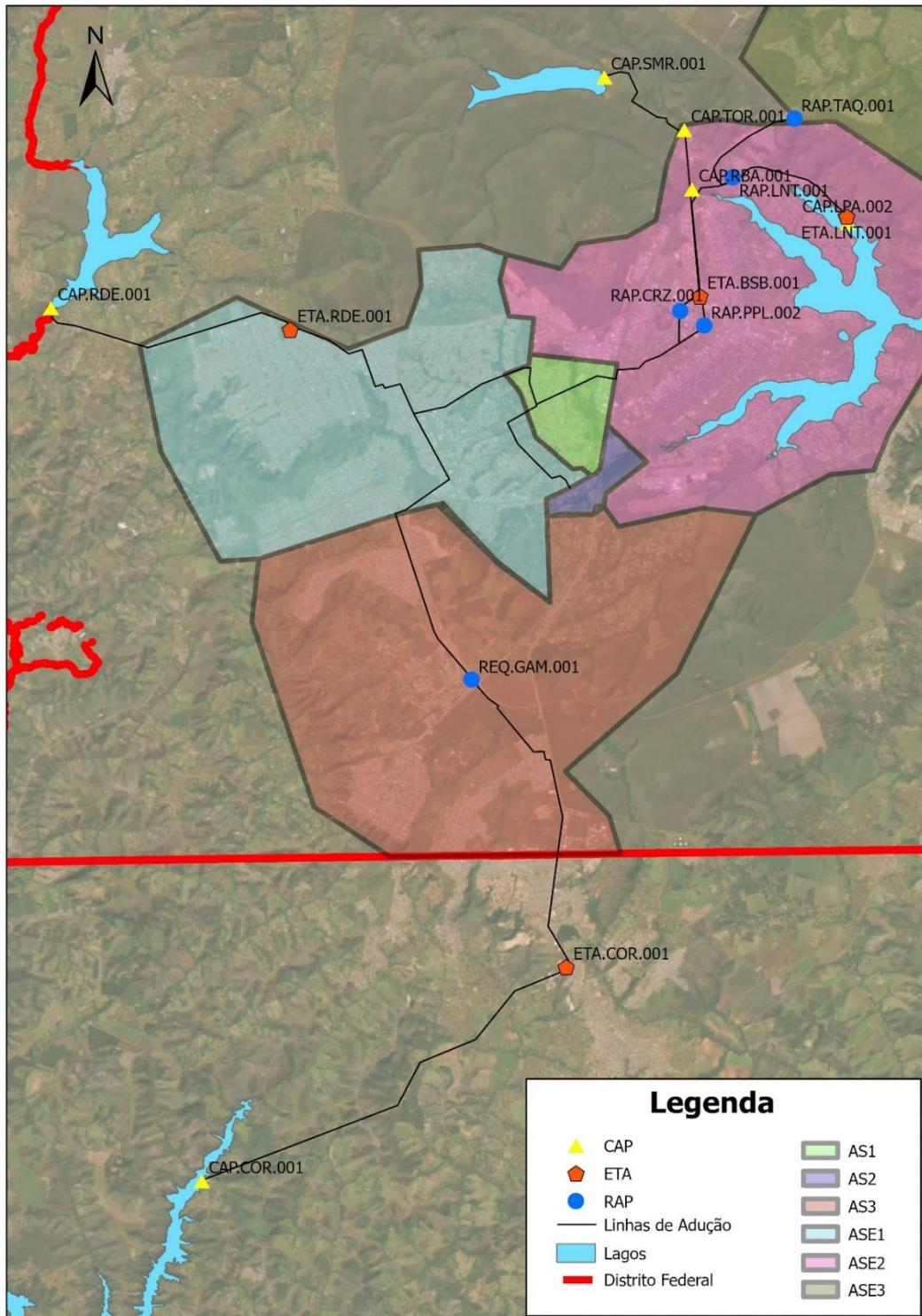


Figura 5.6 - Representação real da interligação entre os sistemas.

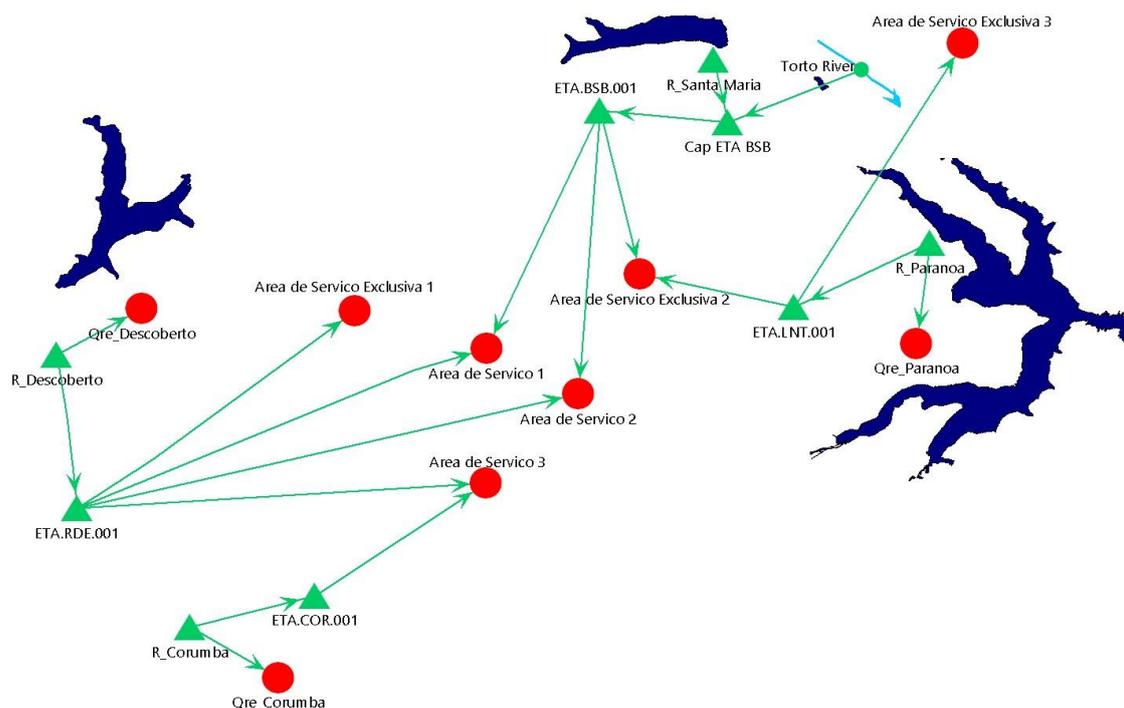


Figura 5.7 - Representação simplificada da integração entre os sistemas no WEAP.

Na configuração atual de distribuição, em 2024, a Área de Serviço 1 está sendo atendida com a água da ETA.BSB.001 e a Área de Serviço 2 está sendo atendida com a água da ETA.RDE.001, ou seja, conforme a Alternativa de Abastecimento 1. Parcela da água produzida na ETA.LNT.001 é transferida para a Área de Serviço Exclusiva 3.

As captações dos reservatórios são limitadas pelas vazões de seus afluentes, suas capacidades de reservação e pelas capacidades de suas respectivas estações de tratamento de água.

A fim de representar as limitações das captações, seja pela vazão outorgada ou limite operacional das estações de tratamento de água, essas também foram representadas como reservatórios com reservação nula. Assim, não há reservação da água excedente a cada passo de tempo, disponibilizando apenas a água possível. As ETAs estão interligadas às suas respectivas captações e possuem restrições de transferência, representando a sua outorga. À medida que as áreas de serviço demandam mais água, aumenta-se essa transferência, respeitando-se as restrições. Essa abordagem foi uma forma de contornar o software que não possuiu uma identificação própria para ETA, além de solucionar o problema de uma ETA com mais de um manancial como fonte de abastecimento (caso da ETA.BSB.001).

5.3.2 Levantamento populacional

Para o cálculo da demanda de cada conjunto de Regiões Administrativas, primeiramente utilizou-se o levantamento populacional elaborado pela Codeplan (2022), organização governamental de planejamento do Distrito Federal, para alocar o quantitativo de habitantes em suas respectivas Regiões Administrativas. Assim, pode-se distribuir essas populações nas áreas de serviço pré-estabelecidas.

Utilizou-se como referência o ano de 2020, por se tratar da data base de início para projeção populacional. Desse modo, a Tabela 5.4 consolida essas informações conforme área de serviço delimitada.

Tabela 5.4 – Áreas de serviço e a população atendida por cada uma em 2020

Grupo	População (2020)
Área de Serviço Exclusiva 1	1.188.855
Área de Serviço Exclusiva 2	632.590
Área de Serviço Exclusiva 3	357.582
Área de Serviço 1	140.560
Área de Serviço 2	40.357
Área de Serviço Exclusiva 3	504.932

5.3.3 Determinação da Produção e Demanda de água

Desde 2017, a distribuição de água nos grupos se manteve em grande parte inalterada, ou seja, as RAs continuam sendo abastecidas pelos mesmos sistemas produtores durante esse período. Desse modo, utilizou-se o histórico de produção do período compreendido entre 2017 e 2022 para calcular a vazão média de produção de cada sistema, atenuando eventuais variações do período.

Além da produção das Estações de Tratamento de Água referenciadas nesse trabalho, para o cálculo da demanda, utilizou-se a produção de todas as unidades de tratamento de cada sistema, conforme Tabela 5.5. Para os dados completos, ver Apêndice A - Vazões médias anuais produzidas por sistema produtor.

Tabela 5.5 - Produção média de água por sistema produtor de água de 2017 à 2022.

Sistema Descoberto	Sistema Torto / Santa Maria / Paranoá
3.993,95L/s	2.619,58L/s

5.3.4 Determinação da Demanda

Para a determinação da demanda das áreas de serviço, partiu-se de uma abordagem ampla, dos grandes sistemas produtores. Inicialmente, levantou-se a população das RAs atendidas pelos sistemas produtores do Descoberto e Torto/Santa Maria/Paranoá durante o período de 2017 à 2022. Assim, a demanda de cada sistema ficou consolidada conforme Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Demanda dos sistemas produtores de água do Distrito Federal.

	Sistema Descoberto	Sistema Torto/ Santa Maria/ Paranoá
Consumo médio 2017-2022 (l/s)	3.993,95	2.619,58
Habitantes (2020)	1.734.144	773.150
Demanda (l/hab/dia)	198,99	292,74
Demanda (m³/hab/ano)	72,63	106,85

Combinando-se essas informações de produção e população para as RAs atendidas por esses sistemas, tem-se a demanda do Sistema Descoberto e do Sistema Torto/Santa Maria/Paranoá.

Desmembrando-se as RAs de cada área de serviço, adotou-se a demanda do sistema produtor principal, o qual cada RA pertence. Desse modo, ao Guará se imputou a demanda do Sistema Torto/Santa Maria/Paranoá. Já para as RAs Gama, Santa Maria e Recanto das Emas, Riacho Fundo II, Parkway, Núcleo Bandeirante e Candangolândia, como sempre foram atendidos pelo Sistema Descoberto, adotou-se a demanda deste sistema. As informações foram consolidadas como Área de Serviço, na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Demanda água por área de serviço.

Grupo	Demanda (m³/hab/ano)
Área de Serviço Exclusiva 1	72,63
Área de Serviço Exclusiva 2	106,85
Área de Serviço 1	106,85
Área de Serviço 2	72,63
Área de Serviço 3	72,63

Relacionou-se diretamente a produção com a demanda de água através da incorporação das perdas de distribuição nos pontos de demanda. Ou seja, ao se tratar da demanda, esta não se refere objetivamente ao consumo dos usuários, mas da demanda exigida dos mananciais. Aumentando-se a demanda, aumenta-se diretamente o volume captado. Esta simplificação foi a forma encontrada de se avaliar o impacto nas captações dos mananciais envolvidos quando se considera a evolução da demanda, pelo crescimento populacional, e políticas de redução de perdas na rede.

A partir dessa abordagem, temos que a $Demanda_{inicial}$ é o Consumo real acrescido da perda na água distribuída. Como se definiu que a Produção é igual à Demanda, temos a Equação (5.1) e sua simplificação (5.2).

$$Demanda_{inicial} = Consumo\ real + Perda_{inicial} \times Demanda_{inicial} \quad (5.1)$$

$$Consumo\ real = Demanda_{inicial} \times (1 - Perda_{inicial}) \quad (5.2)$$

Durante a avaliação da redução das perdas, teremos uma $Demanda_{reduzida}$ devida à uma $Perda_{reduzida}$, conforme equação (5.3).

$$Demanda_{reduzida} = Consumo\ real + Perda_{reduzida} \times Demanda_{inicial} \quad (5.3)$$

Onde,

$$Perda_{reduzida} = Perda_{inicial} - Redução \quad (5.4)$$

Substituindo a equação (5.2) e (5.4) em (5.3), teremos a Equação (5.5) e (5.6).

$$\begin{aligned} Demanda_{reduzida} & \\ &= Demanda_{inicial} \times (1 - Perda_{inicial}) \\ &+ Demanda_{inicial} \times (Perda_{inicial} - Redução) \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$Demanda_{reduzida} = Demanda_{inicial} - Demanda_{inicial} \times Redução \quad (5.6)$$

Assim chegamos na Equação (5.7) que simplifica a forma como a redução de perdas se reflete diretamente na $Demanda_{inicial}$.

$$Demanda_{reduzida} = Demanda_{inicial} \times (1 - Redução) \quad (5.7)$$

Assim, simulou-se a redução inicial do índice de perdas para analisar o impacto dessa ação frente a diferentes alternativas de abastecimento e crescimentos populacionais.

5.3.5 Determinação da população atendida

Definida a demanda, utilizando-se todas as unidades de tratamento do sistema produtor de água do DF, fez-se uso de uma simplificação do modelo para a simulação do sistema distribuidor.

Para se obter uma relação direta entre a produção das ETA.RDE.001, ETA.BSB.001 e ETA.LNT.001 e suas áreas de atendimento na distribuição de água, ajustou-se proporcionalmente a população de cada área de acordo com a participação dessas unidades de tratamento dentro do sistema produtor, no período compreendido entre 2017 e 2022. Ou seja, uma representação da população efetivamente atendida por determinada unidade de tratamento.

A Tabela 5.8 apresenta a relação de produção da ETA.RDE.001 com o Sistema Descoberto e das ETA.BSB.001 e ETA.LNT.001 com o Sistema Torto/ Santa Maria/ Paranoá, respectivamente.

Tabela 5.8 - Relação da proporção de produção de água entre as Estações de Tratamento de Água e as demais unidades de tratamento dos sistemas produtores de água do Distrito Federal.

Sistema Produtor	Unidades de Tratamento	Relação²
Descoberto	ETA.RDE.001	96%
	Demais unidades	4%
Torto/ Santa Maria/ Paranoá	ETA.BSB.001/ ETA.LNT.001	93%
	Demais unidades	7%

Como a ETA.RDE.001 representou 96% da produção do Sistema Descoberto e as ETA.BSB.001 e ETA.LNT.001 em conjunto representaram um percentual de 93% do Sistema Torto/Santa Maria/Paranoá, reduziu-se nessa mesma proporção a população dependente de cada estação de tratamento, chegando à população atendida. Ao Guará, Núcleo Bandeirante, Candangolândia, Gama, Santa Maria e Recanto das Emas, considerou-se a alternativa de abastecimento de 2020, refletindo a população atendida conforme Tabela 5.9.

Então, no caso do Sistema Descoberto, admitiu-se que 96% da população atendida por esse sistema efetivamente é atendida pela ETA.RDE.001. De forma análoga, 93% da população da área de serviço do Sistema Torto/Santa Maria/Paranoá é atendida pela ETA.BSB.001 e ETA.LNT.001

Tabela 5.9 - População de cada área de serviço efetivamente atendida pelas ETAs Rio Descoberto, Brasília e Lago Norte de Água do Distrito Federal.

Grupo	População Total (2020)	População atendida (2020)
Área de Serviço Exclusiva 1	1.188.855	1.141.301
Área de Serviço Exclusiva 2	632.590	588.309
Área de Serviço 1	140.560	130.721
Área de Serviço 2	40.357	38.743
Área de Serviço 3	504.932	484.735

² Informação técnica obtida junto a área de produção de água da Caesb.

5.3.6 Evolução da demanda

Assim, com a estimativa populacional e a demanda de água por habitante, foram simuladas as variações nos mananciais de acordo com o aumento da demanda futura.

Como a faixa de variação do crescimento pode variar em relação ao estimado pela Codeplan (2022), 12% entre 2020 e 2030, criou-se uma faixa que compreendesse essas possibilidades. Assim, para todas as áreas de serviço, considerou-se o crescimento populacional variando de 1% a 2% ao ano, durante o horizonte temporal de 40 anos de simulação.

Adotando-se a demanda calculada (Tabela 5.7) com o crescimento da população, temos o crescimento da demanda de água futura.

5.3.7 Transferências de água entre sistemas

Para a transferência da água da ETA.LNT.001 para Sobradinho, Área de Serviço Exclusiva 3, adotou-se o limite da infraestrutura instalada, 180L/s. Essa é a vazão média que a infraestrutura instalada consegue transferir diariamente. Ao contrário do restante das demandas, que variam com o crescimento populacional estipulado, definiu-se essa vazão fixa, pois independentemente da demanda de Sobradinho, essa vazão é limitada à capacidade da infraestrutura instalada.

5.3.8 Comportamento dos Reservatórios

No modelo foram adotadas condições específicas para cada um dos 4 reservatórios de acumulação utilizados no presente estudo. Estas condições são importantes, pois definem a disponibilidade hídrica dos mananciais para atendimento às demandas das simulações.

Para cada um dos reservatórios, foram utilizadas as relações entre as cotas altimétricas e o volume de reservação, as chamadas curvas de Cota x Volume. Com elas, além da capacidade máxima de reservação, há o controle do volume do respectivo manancial ao passo de tempo em que a simulação se desenvolve.

De modo geral, a elevação mensal ajustada varia entre a cota máxima operacional do reservatório, que é a sua capacidade total, e a elevação operacional, representando o limite de segurança operacional. Entre esses dois limites, tem-se o volume útil disponível para a simulação, chamado de reservação de operação, conforme apresentado na Figura 3.3.

A forma de operação, também é um fator importante para a consideração da disponibilidade hídrica durante a simulação, a qual foi discretizada para cada reservatório.

- **Descoberto**

Esse reservatório é a fonte da água bruta a ser tratada na ETA.RDE.001. Segundo Adasa (2022), sua outorga atual limita em 4.300L/s a vazão máxima de retirada. Além desse direito de uso, a CAESB deve garantir uma vazão remanescente de 430L/s. Como limitante operacional do reservatório, estabeleceu-se o limite de segurança operacional equivalente de 51% do volume total do reservatório. Essa proporção é o valor mínimo da curva de referência para o acompanhamento do volume útil dos reservatórios do Descoberto e do Santa Maria, estabelecido em 2023 pela Adasa (2023a). As vazões dos tributários afluentes foram definidas como entradas e como saídas, a retirada direta para abastecimento, a vazão remanescente e a evaporação do lago.

- **Santa Maria**

Esse reservatório, localizado dentro do Parque Nacional de Brasília, possui uma vazão outorgada de 1.478 L/s e não possui vazão remanescente, de acordo com o DNAEE (1995). Esse manancial é uma das fontes de água bruta para tratamento na ETA Brasília. De forma análoga ao reservatório do Descoberto, com base na curva de referência da Adasa (2023a), estabeleceu-se o limite de segurança operacional equivalente à 51% do volume total do reservatório. As vazões dos tributários afluentes foram definidas como entradas e como saídas, a retirada direta para abastecimento e a evaporação do lago.

- **Lago Paranoá**

Ao contrário dos reservatórios Descoberto e Santa Maria, o Lago Paranoá possui usos múltiplos e uma operação mais complexa. Além das vazões afluentes dos tributários, possui

duas grandes entradas, a ETE Brasília Norte e a ETE Brasília Sul, com as respectivas vazões de projeto de 920L/s e 1.500L/s. Os grandes usuários do Lago Paranoá são a Caesb, para abastecimento público, e a CEB Geração, para geração de energia elétrica. Como retiradas do Lago, tem-se uma parcela para ETA Lago Norte, turbinação da CEB Geração e vazão remanescente constante de 1.000L/s. A Adasa (2023b) estabeleceu a variação de nível altimétrico do lago entre 999,5m e 1.000,8m. Compatibilizou-se essa faixa com a batimetria utilizada no estudo, definindo-se o limite de 999m a 1000m. Diante dessa complexidade operacional, onde a utilização do manancial pela CEB independe do controle operacional da Caesb, como a vazão turbinada e aberturas das comportas da Barragem do Paranoá, optou-se por algumas simplificações. Como a vazão de entrada nominal dos efluentes das ETEs no Lago Paranoá são superiores à captação para a ETA Lago Norte, optou-se por não as considerar como afluentes tributários do lago, buscando-se uma análise mais conservadora, ou seja, em favor da segurança. Quanto à vazão turbinada, por não ser constante e depender de avaliações de competência da CEB Geração, foi desconsiderada. Como saídas do reservatório considerou-se a vazão captada para a ETA Lago Norte, limitada à 700L/s (Adasa, 2017), e vazão remanescente constante do lago, além da evaporação.

- **Corumbá**

As considerações para o reservatório do Corumbá se assemelham ao do Lago Paranoá, pois a Caesb não é a única usuária. O reservatório se encontra no estado de Goiás e é o que apresenta maior volume de reserva dentro do estudo de caso. O Corumbá possui múltiplos usos, além da captação para abastecimento, tem-se a geração de energia elétrica pela Corumbá Concessões S.A. e uso recreativo. Como restrição de uso, estabeleceu-se a cota mínima operacional do reservatório, 837m. Foram desconsideradas as vazões de turbinação. A vazão remanescente do Lago Corumbá, estabelecida pelo IBAMA (2003), é de 13.700L/s. Desse modo, como entradas temos as vazões dos tributários afluentes e como saídas, a retirada direta para a ETA.COR.001, a vazão remanescente e a evaporação do lago.

5.3.9 Capacidade de produção

Os conceitos de vazão de projeto e capacidade de produção podem ser iguais, mas não necessariamente. Limitações operacionais em equipamentos, ou outorgas reduzidas,

impactam na utilização integral de uma unidade de tratamento. Assim, listaram-se as unidades de tratamento às suas capacidades de produção.

De modo geral, o que limita cada transferência para os sistemas é a capacidade de produção de cada estação de tratamento em conjunto com a outorga dos mananciais, conforme Tabela 5.10. No caso específico da ETA.COR.001, limitou-se a capacidade de bombeamento da elevatória de água tratada à jusante (EAT.VLG.001), pois, atualmente há essa limitação de adução para o Distrito Federal.

Tabela 5.10 - Capacidade de produção das ETAs³.

Manancial	Outorga	ETA	Vazão de projeto da ETA	Capacidade de produção
Descoberto	4300L/s	ETA.RDE.001	6000L/s	4300L/s
Santa Maria	1478L/s	ETA.BSB.001	2800L/s	2800L/s
Torto + Bananal	1647L/s + 600L/s			
Lago Paranoá	700L/s	ETA.LNT.001	700L/s	700L/s
Lago Corumbá	5600L/s	ETA.COR.001	2800L/s	1700L/s

A capacidade de transferência para o Sistema Sobradinho/ Planaltina é a capacidade instalada, 180L/s.

É importante ressaltar que a capacidade de produção das unidades é a capacidade de produção instantânea que normalmente não se mantém constante durante longos períodos. De forma análoga ao coeficiente do dia de maior consumo (k1), aplicou-se um coeficiente na capacidade de produção para se representar a produção média mensal das estações de tratamento. Ao compararmos a produção média de cada ETA (sua capacidade efetiva) no período compreendido entre os anos de 2017 e 2022 e a capacidade de produção das estações de tratamento, obtemos um coeficiente que varia entre 1,1 e 1,6, conforme Tabela 5.11. Segundo Azevedo Neto (1998), no caso do coeficiente do dia de maior consumo, há essa mesma variação, reforçando a comparação.

³ Informação técnica obtida junto a área de produção de água da Caesb.

No caso específico da ETA.COR.001, por se ter um histórico reduzido de dados de produção, adotou-se o k1 calculado para a ETA.RDE.001, em virtude do atendimento às mesmas Regiões Administrativas.

Tabela 5.11 - Capacidade efetiva de produção das ETAs.

Estação	Capacidade de Produção	k1	Capacidade Efetiva
ETA.RDE.001	4.300L/s	1,1	3.835L/s
ETA.COR.001	1.700L/s	1,1*	1.545L/s
ETA.BSB.001	2.800L/s	1,4	1.985L/s
ETA.LNT.001	700L/s	1,6	448L/s

*Adotado k1 da ETA.COR.001 igual ao da ETA.RDE.001.

5.3.10 Priorização de mananciais

No WEAP há a possibilidade de se estabelecer priorizações para a utilização de linhas de adução de água, ou seja, pode-se priorizar a utilização de mananciais e áreas de serviço. A prioridade 1 indica a preferência na utilização de determinado manancial. Números maiores indicam uma preferência menor e serão utilizados apenas quando o de maior preferência não for capaz de suprir a demanda.

No caso dos mananciais foi estabelecida a prioridade da retirada da vazão remanescente sobre a captação para abastecimento, de forma a garantir o atendimento à condicionante de outorga. Para as captações que alimentam a ETA.BSB.001, o lago Santa Maria recebeu uma priorização secundária, dando preferência ao conjunto Torto e Bananal.

Para as transferências aos pontos de demanda foram estabelecidas as mesmas prioridades, exceto para as áreas atendidas pela ETA.LNT.001. Estabeleceu-se a prioridade de transferência para atendimento à Área de Serviço Exclusiva 3 sobre a Área de Serviço Exclusiva 2, de forma a garantir ao máximo a transferência para a primeira.

5.4 SIMULAÇÃO

Com cada cenário carregado de seus parâmetros específicos, a simulação se dá conforme apresentado na metodologia.

5.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O desempenho dos sistemas será avaliado por meio de três métricas, quais sejam, o consumo de energia elétrica, a intensidade de falhas no atendimento às áreas de serviço e a quantificação das falhas nos reservatórios de acumulação. Tais métricas serão avaliadas diante do conjunto de cenários de simulação, incluindo a redução de perdas dos cenários.

5.5.1 Consumo de energia elétrica

Outro parâmetro definido para avaliação dos cenários foi o consumo de energia elétrica. O objetivo dessa escolha foi a de se contornar os efeitos dos reajustes tarifários na energia elétrica. Utilizou-se o consumo (kWh) das faturas de energia elétrica das unidades envolvidas até as unidades de tratamento. Utilizaram-se os dados de energia elétrica das Elevatórias de Bombeamento de Água Bruta até as Estações de Tratamento de Água. Incluíram-se, também, as Estações Elevatórias de Água Tratada envolvidas na adução da água tratada, contidas nos complexos de tratamento.

Como base de dados de energia elétrica e volume produzido, escolheu-se 2022, pela continuidade nos valores das faturas de energia elétrica e pela entrada do Sistema Corumbá ter se dado em setembro desse ano. Em razão disso, apenas para a ETA Corumbá, foram utilizados 4 meses de dados.

Não foi possível acesso aos dados de consumo da EAB.COR.001, apenas o valor do custo das faturas de energia elétrica. Como contorno à essa lacuna de dados, utilizou-se o custo relativo por consumo (R\$/kWh) do complexo ETA.COR.001 para cálculo do consumo da EAB.COR.001 (Tabela 5.12). A concessionária responsável por essas duas unidades é a mesma, Equatorial Energia, justificando essa parametrização.

Tabela 5.12 - Parametrização do consumo de energia elétrica (kWh) da EAB.COR.001.

Unidade	Consumo (kWh)	Custo (R\$)	R\$/kWh
ETA.COR.001	4,081,219,30	R\$2,087,031.61	0.51
EAB.COR.001	758,708.04	R\$1,483,664.11	0.51

As unidades relacionadas à cada ETA foram agrupadas de forma a se totalizar o consumo e cada grupo (Tabela 5.13).

Tabela 5.13 - Bloco de unidades relacionadas às ETAs que compõe o consumo de energia elétrica.

Estação de Tratamento de Água	Unidades Componentes
ETA.RDE.001	EAB.RDE.001, ETA.RDE.001, EAT.MNT.001, EAT.MNT.002, EAT.MNT.003, EAT.MNT.004, EBO.MNT.001, EBO.MNT.002
ETA.BSB.001	EAB.TOR.001, EAB.SMR.001, EAB.RBA.001, EAB.RBA.002, ETA.BSB.001, EAT.PPL.001
ETA.LNT.001	EAB.LPA.002, ETA.LNT.001, EAT.LNT.003
ETA.COR.001	EAB.COR.001, ETA.COR.001, EAT.VLG.001

O consumo de energia elétrica (kWh) e o volume produzido (m³) por cada unidade de tratamento foram totalizados para o cálculo da relação de consumo por volume produzido de cada ETA (Tabela 5.14). Nota-se que a utilização da água produzida na ETA.COR.001 apresenta um consumo energético superior a todas as outras unidades de tratamento consideradas, o que se deve pelo grande desnível geométrico, cerca de 240km até o limite do Distrito Federal, a ser vencido pelo bombeamento das elevatórias de água bruta e tratada.

Tabela 5.14 - Consumo médio por volume produzido das ETAs (kWh/m³).

Unidade	Volume (m ³)	Consumo (kWh)	kWh/m ³
ETA.BSB.001	65,032,417.00	43,762,930.00	0.67
ETA.COR.001	4,203,007.14	4,839,927.34	1.15
ETA.LNT.001	17,998,665.54	12,222,554.00	0.68
ETA.RDE.001	127,416,231.35	123,333,680.00	0.97

Nas simulações, a produção necessária para atender cada área de serviço demandou um volume variável de cada ETA, a cada passo de tempo. Através da aplicação dos resultados do estudo de caso a Equação (4.3), com a totalização do volume produzido por unidade de tratamento durante os 40 anos de simulação e o custo energético de produção dessa água, calculou-se o consumo energético total para disponibilização de toda essa produção, expresso pela Equação (5.8). A soma dos consumos de cada ETA é o consumo total para determinada simulação.

$$C_{Total} = \sum_{t=1}^{40} (0,97 \times P_{RDE,t} + 0,67 \times P_{BSB,t} + 0,68 \times P_{LNT,t} + 1,15 \times P_{COR,t}) \quad (5.8)$$

Em que:

C_{Total} = Consumo de energia elétrica, em kWh/40 anos;

P_{RDE} , P_{BSB} , P_{LNT} , P_{COR} = Volume acumulado produzido pela respectiva ETA, em m³/40 anos;

5.5.2 Intensidade das falhas no atendimento

Ao se simular cada cenário, quantificou-se a intensidade de não atendimento às demandas das áreas de serviço a cada ano, a intensidade de falhas de atendimento. Totalizou-se para cada ano simulado, as demandas e os volumes anuais que não foram entregues às áreas de serviço. A partir da relação entre esses valores, calculou-se a intensidade das falhas de atendimento anual de cada cenário. Para se comparar o comportamento de cada cenário, aplicou-se os resultados a Equação (4.4), calculando-se a média desses indicadores anuais, conforme Equação (5.9), onde valores menores representam uma distribuição de água com melhor atendimento aos consumidores finais.

$$I_{Falhas} = \frac{1}{40} \sum_{t=1}^{40} \frac{DNA_t}{D_t} \quad (5.9)$$

Em que:

I_{Falhas} = Intensidade de falhas de atendimento à demanda, adimensional;

DNA = Volume de demanda não atendida, em m³/ano;

D = Volume demandado pelas áreas de serviço, em m³/ano.

5.5.3 Falhas na reservação

A cada passo de tempo da simulação, a medida em que são realizadas retiradas dos reservatórios, há alteração na elevação mensal ajustada do reservatório e, conseqüentemente, alteração no volume disponível para operação. Desse modo, através da aplicação das Equação (4.5), também foram quantificadas a quantidade de meses, durante todo o período simulado, no qual se chegou ao limite estabelecido de operação, para cada reservatório, conforme equações (5.10), (5.11), (5.12) e (5.13). A quantidade total de falhas mensais nos reservatórios foi representada através da Equação (5.14).

$$F_{Descoberto} = \sum_{t=1}^{480} I(EA_{Descoberto_t} \leq EO_{Descoberto_t}) \quad (5.10)$$

$$F_{Corumbá} = \sum_{t=1}^{480} I(EA_{Corumbá_t} \leq EO_{Corumbá_t}) \quad (5.11)$$

$$F_{SantaMaria} = \sum_{t=1}^{480} I(EA_{SantaMaria_t} \leq EO_{SantaMaria_t}) \quad (5.12)$$

$$F_{Paranoá} = \sum_{t=1}^{480} I(EA_{Paranoá_t} \leq EO_{Paranoá_t}) \quad (5.13)$$

$$F_{total} = F_{Descoberto} + F_{Corumbá} + F_{SantaMaria} + F_{Paranoá} \quad (5.14)$$

Em que:

EA_R = Elevação ajustada do reservatório, em metros;

EO_R = Elevação operacional do reservatório i , em metros;

F_R = Quantidade de falhas por reservatório, adimensional;

F_{Total} = Quantidade de falhas de todos os reservatórios, adimensional;

5.5.4 Redução de perdas

Segundo a Caesb⁴, foram executados R\$20.268.198,8 em investimentos no combate e redução das perdas de água na distribuição em 2022. Das ações que compõe esse valor estão a substituição de adutoras, redes e ramais, além da setorização de redes, aquisição e substituição hidrômetros e telemetria.

Segundo a Caesb (2024), as perdas de distribuição da Caesb em 2021 foram da ordem de 35,07% e em 2022 fecharam em 33,81%. Ou seja, foram gastos R\$9,836,018.83 para reduzir 1% da perda na distribuição.

Com a disponibilidade de apenas um ano de intervalo entre ações de redução de perdas e os custos envolvidos nelas, decidiu-se relacionar as reduções de perdas a um número adimensional. Thorton *et al.* (2008) afirmam que, enquanto os custos de conserto de vazamentos são fixos, os custos de detecção dos mesmos seguem uma curva exponencial à medida que se reduz as perdas. Ou seja, o custo se intensifica o quanto mais se reduz as perdas.

Do ponto de vista estritamente financeiro para a companhia de saneamento, apesar da aparente incoerência, pode parecer vantajoso não dispendir recursos nas ações de redução de perdas enquanto houver disponibilidade hídrica na região, evitando se elevar gastos com redução de perdas. No entanto, na visão de longo prazo e diante de cenários de mudanças climáticas e crescentes incertezas, o controle do nível de perdas nos sistemas é uma política a ser valorizada e colocada na agenda de planejamento das companhias de saneamento, uma

⁴ Informação técnica obtida junto ao setor de planejamento da Caesb.

vez que permite adiar investimentos na expansão do sistema, o que também traz ganhos financeiros.

5.6 RESULTADOS

Na Tabela 5.15 é apresentada uma análise detalhada dos conjuntos de resultados dos objetivos relacionados as simulações para cada Alternativa de Abastecimento, incluindo os valores mínimo, máximo e a média. Esses indicadores estatísticos nos permitem ter uma visão geral do comportamento de cada conjunto de dados, facilitando a compreensão das variações dentro de cada alternativa.

Tabela 5.15 - Conjunto de resultados dos objetivos relacionados às alternativas de abastecimento.

		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Todos
Intensidade de Falha de Atendimento	Mínimo	0,059	0,018	0,072	0,018
	Média	0,129	0,103	0,138	0,124
	Máximo	0,223	0,208	0,228	0,228
Energia Elétrica	Mínimo	7,79x10 ⁹	8,10x10 ⁹	7,44x10 ⁹	7.44x10 ⁹
	Média	8,40x10 ⁹	8,64x10 ⁹	8,16x10 ⁹	8.40x10 ⁹
	Máximo	8,86x10 ⁹	9,05x10 ⁹	8,86x10 ⁹	9.05x10 ⁹
Falha de Reservatório	Mínimo	0	0	0	0
	Média	2,999	4,670	2,682	3,450
	Máximo	29	35	29	35

Ao observá-los individualmente, conseguimos extrair informações relevantes. Dentre elas, tratando-se do objetivo de intensidade de falhas de atendimento, notamos que a Alternativa 2, apresentou a média de 0,103, sendo a que se apresenta mais favorável. A Alternativa 3 é a menos interessante, apresentando média de 0,138. Isto é, o comportamento da Alternativa 3, apresenta uma intensidade de falhas média superior a Alternativa 2, não sendo mais favorável nesse objetivo.

Por outro lado, analisando apenas o objetivo de redução do consumo de energia elétrica, a Alternativa 3 é a mais favorável, apresentando média de $8,16 \times 10^9$, enquanto a Alternativa 2 apresenta a média de $8,64 \times 10^9$, o resultado mais desfavorável das alternativas. O mesmo comportamento se repete quando analisamos o objetivo de redução da falha de reservatórios, tendo a Alternativa 3 com média de 2,682, contra as 4,670 falhas da Alternativa 2.

Nota-se que a Alternativa 3, onde se tem um menor consumo de energia elétrica é o que apresenta uma maior intensidade de falhas de atendimento e o contrário acontece com a Alternativa 2. Isso revela que a alternativa de abastecimento 3, com a utilização da ETA.BSB.001 e ETA.LNT.001 para atendimento das Áreas de Serviço 1 e 2, apesar de apresentar um custo energético menor, impõe restrições de capacidade de atendimento de demanda, resultando em uma falha de atendimento mais intensa.

A partir dessa análise preliminar, visualizamos que existem objetivos conflitantes na determinação de uma Alternativa que apresente um desempenho mais favorável.

Os objetivos de cada cenário foram plotados em um gráfico de coordenadas paralelas (Figura 5.8), a fim de identificar sinergias e *trade off* entre objetivos. Cada linha no gráfico representa uma simulação para um cenário, ou seja, um cenário com uma das 1.000 séries representativas das condições climáticas. Desse modo, estão representadas as 108.000 simulações.

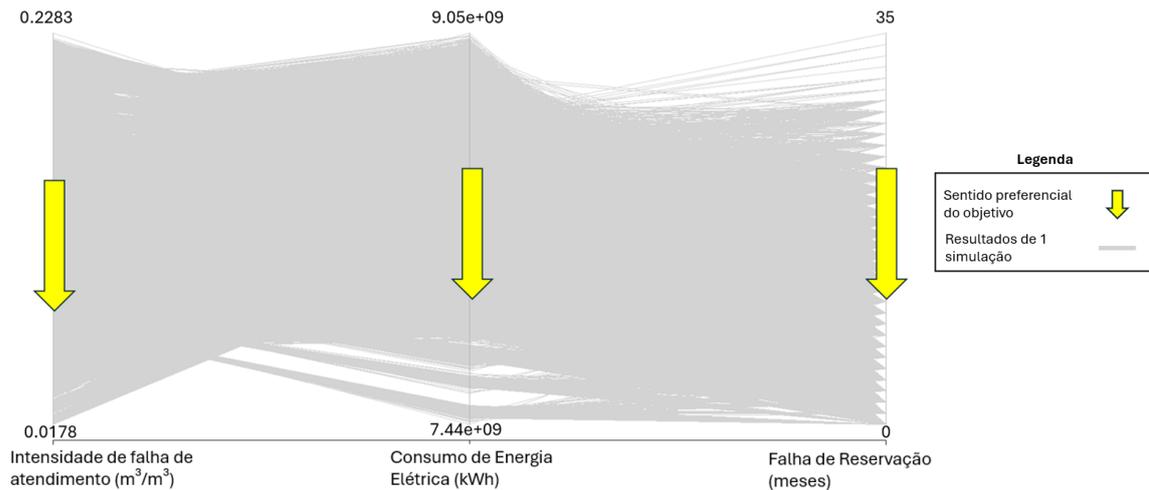


Figura 5.8 - Gráfico de coordenadas paralelas dos resultados e sentido preferencial dos objetivos.

Representou-se cada conjunto de resultados dos objetivos das Alternativas de Abastecimento separadamente, de forma a entendermos qual o comportamento de cada uma delas, ilustradas na Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11. A princípio, percebe-se uma relação característica na comparação entre a intensidade de falha de atendimento e consumo de energia elétrica de cenários em alternativas de abastecimento distintas.

Na alternativa de abastecimento 1 (Figura 5.9), os resultados estão deslocados, em sua grande maioria, para valores superiores de intensidade de falha de atendimento, enquanto o consumo de energia elétrica está centralizado.

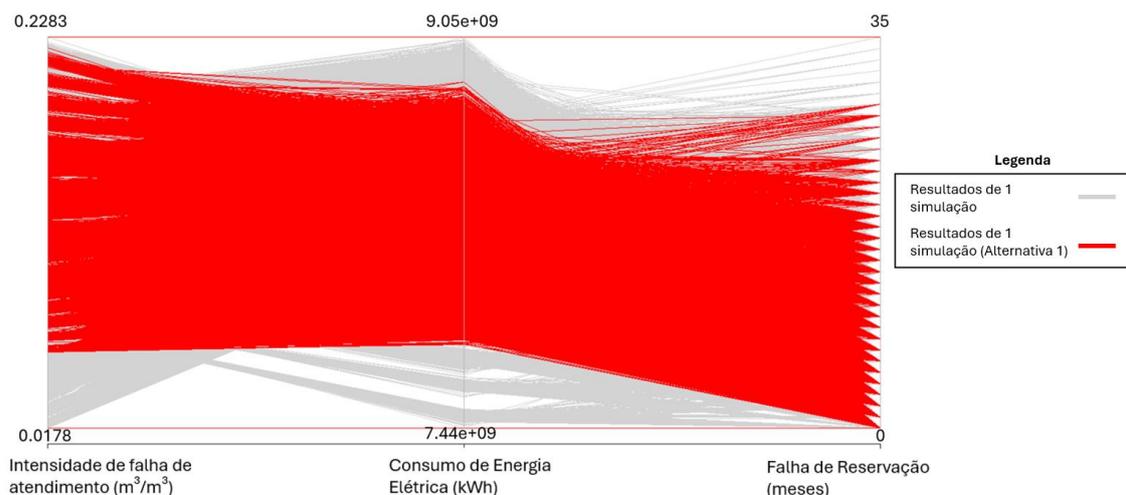


Figura 5.9 - Desempenho da Alternativa de Abastecimento 1 (36.000 simulações) em relação à todas as simulações (108.000 simulações).

Já na alternativa de abastecimento 2 (Figura 5.10), os resultados para a intensidade de falha de abastecimento estão concentrados nos valores menores, mas o consumo energético está nos maiores.

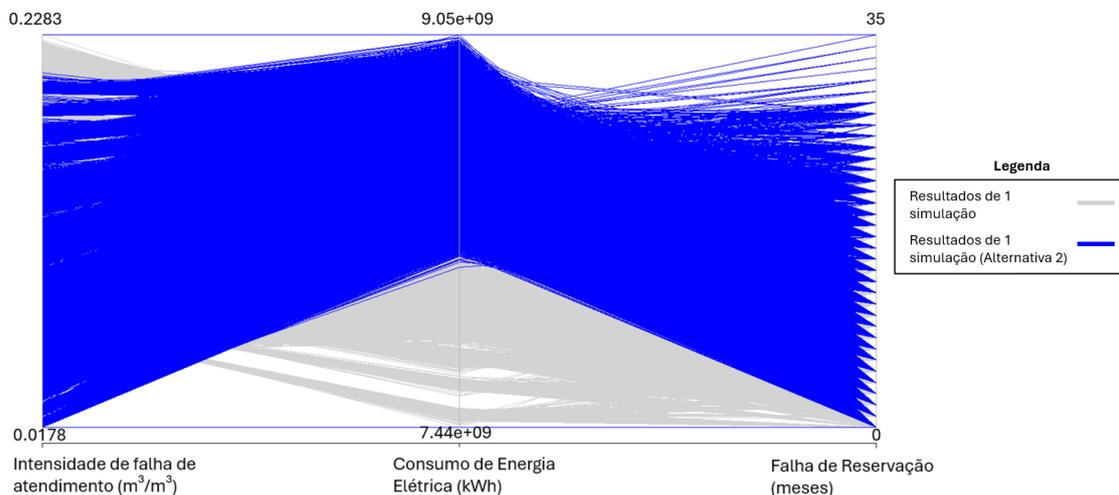


Figura 5.10 - Desempenho da Alternativa de Abastecimento 2 (36.000 simulações) em relação à todas as simulações (108.000 simulações).

Agora, na alternativa de abastecimento 3 (Figura 5.11), os resultados para as falhas de atendimento se acumulam nos maiores valores de intensidade e o consumo energético está mais favorável, concentrando-se em valores menores.

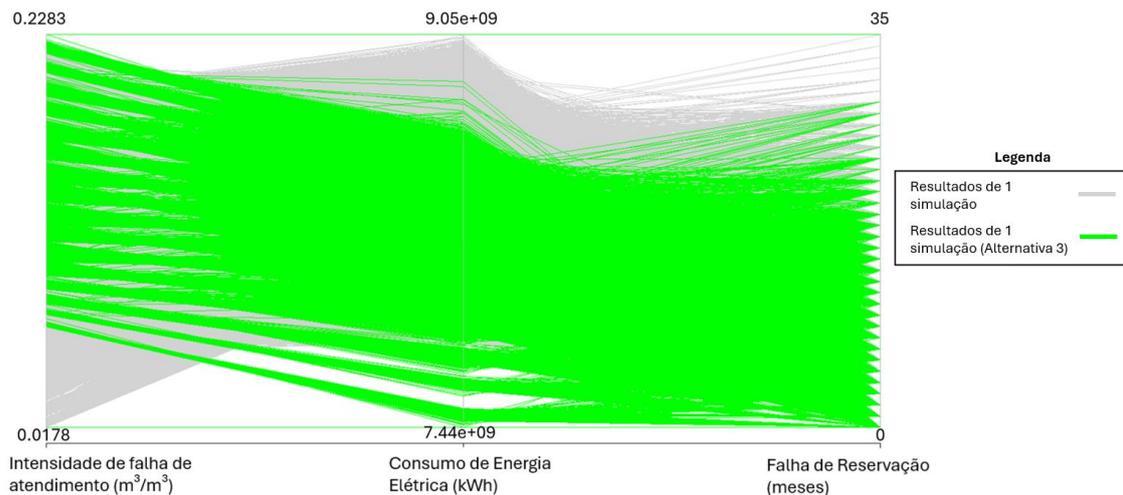


Figura 5.11 - Desempenho da Alternativa de abastecimento 3 (36.000 simulações) em relação à todas as simulações (108.000 simulações).

Como cada Alternativa de Abastecimento apresenta um conjunto de 36.000 linhas de simulações distribuídas, para se selecionar os cenários em que o sistema apresenta melhor desempenho e verificar em qual alternativa de abastecimento as simulações pertencem, foram estabelecidos limites, ou critérios de desempenho, para cada um dos objetivos. Desse modo, o conjunto de cenários enquadrados abaixo desses limites foram identificados. Os limites definidos foram as médias dos objetivos de intensidade de falha de atendimento, consumo de energia elétrica e falha nos reservatórios de acumulação, conforme equações (5.15), (5.16) e (5.17).

$$L_{Falhas} = \frac{1}{108000} \sum_{n=1}^{108000} I_{Falhas,n} \quad (5.15)$$

$$L_{Energia} = \frac{1}{108000} \sum_{n=1}^{108000} C_{Total,n} \quad (5.16)$$

$$L_{Reserva\c{c}o} = \frac{1}{108000} \sum_{n=1}^{108000} F_{Total,n} \quad (5.17)$$

Em que:

L_{Falhas} = Limite do critério de desempenho do objetivo relacionado à intensidade de falhas de atendimento à demanda;

$L_{Energia}$ = Limite do critério de desempenho do objetivo relacionado a consumo de energia elétrica;

$L_{Reserva\c{c}o}$ = Limite do critério de desempenho do objetivo relacionado ao de falhas dos reservatórios de acumulação;

n = Número de simulações;

Inicialmente, foram avaliadas as três alternativas de abastecimento. Conforme, apresentado na Tabela 5.15, as médias dos resultados das simulações para cada objetivo coincidem com o limite estabelecido pelas equações (5.15), (5.16) e (5.17) de desempenho na seleção dos cenários. Todas as simulações que apresentarem resultados inferiores aos critérios de desempenho serão contabilizadas.

Na Figura 5.12, representam-se as linhas de simulações que atenderam aos limites estabelecidos. Elas foram discriminadas através de cores, representando uma alternativa de abastecimento cada, sendo a Alternativa 1 (vermelho), Alternativa 2 (azul) e Alternativa 3 (verde). 26.067 simulações apresentaram resultados que atenderam simultaneamente aos 3 critérios de desempenho, sendo elas 11.950 pertencentes a Alternativa 1, 1.565 a Alternativa 2 e 12.552 a Alternativa 3.

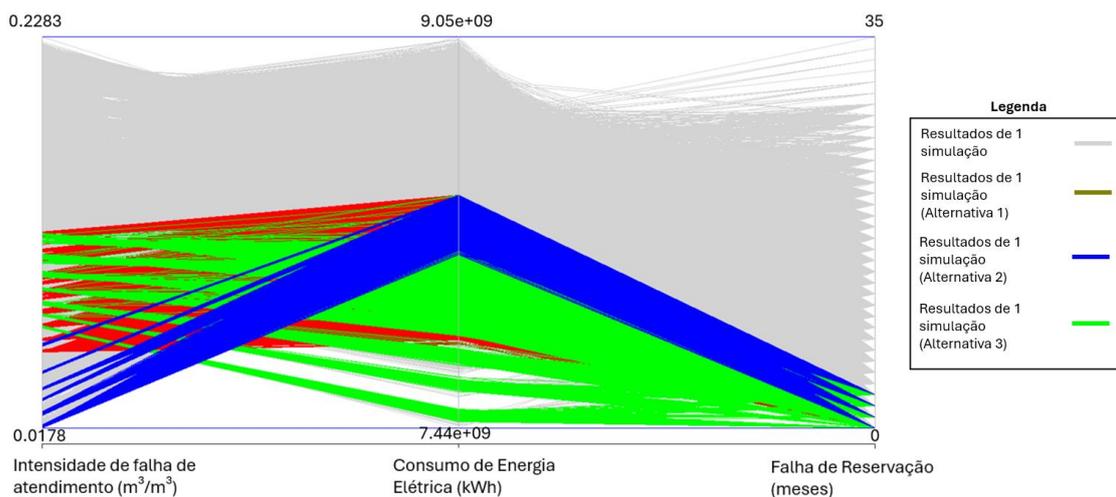


Figura 5.12 – Seleção das simulações que atendem aos critérios de desempenho dos objetivos.

Através da seleção de simulações apresentada na Figura 5.12, nota-se que a alternativa de abastecimento 2 é a que contém os menores resultados para o objetivo de intensidade de falha de atendimento, apresentando os maiores valores de consumo de energia elétrica. Isso mostra que a combinação das ETAs consegue atender melhor às áreas de serviço a um custo energético mais elevado.

A Tabela 5.16 apresenta a quantidade de simulações discretizadas por faixas de redução de perdas. Nota-se que a Alternativa 2 só atende aos critérios de desempenho, a partir de uma redução de perdas reais de 6%, ou seja, com a utilização atual dos mananciais, sem uma redução nas perdas reais, não é viável a seleção dessa alternativa. As Alternativas 1 e 3 aparecem em todas as faixas de redução de perdas. Entretanto, a quantidade de simulações da Alternativa 3 foram selecionadas em uma quantidade superior à da Alternativa 1, tornando-a mais interessante.

Tabela 5.16 - Simulações pertencentes a cada alternativa de abastecimento.

Redução de Perdas	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
	Simulações	Relação	Simulações	Relação	Simulações	Relação
0%	709	2%	0	0%	810	2%
2%	1276	4%	0	0%	1605	4%
4%	1782	5%	0	0%	1680	5%
6%	2244	6%	224	1%	2483	7%
8%	2916	8%	466	1%	2575	7%
10%	3023	8%	875	2%	3399	9%

Na Figura 5.13, ampliou-se o gráfico de coordenadas paralelas, acrescentando-se a informação de redução de perdas, de forma a examinar a trajetória de cada conjunto de simulações pertencentes a uma determinada condição de redução de perdas. Observa-se uma característica principal no comportamento da intensidade de falha de atendimento, pois quanto maior a redução de perdas, menor a intensidade de falhas, pois se reduz o stress hídrico, disponibilizando-se mais água para as áreas de serviço.

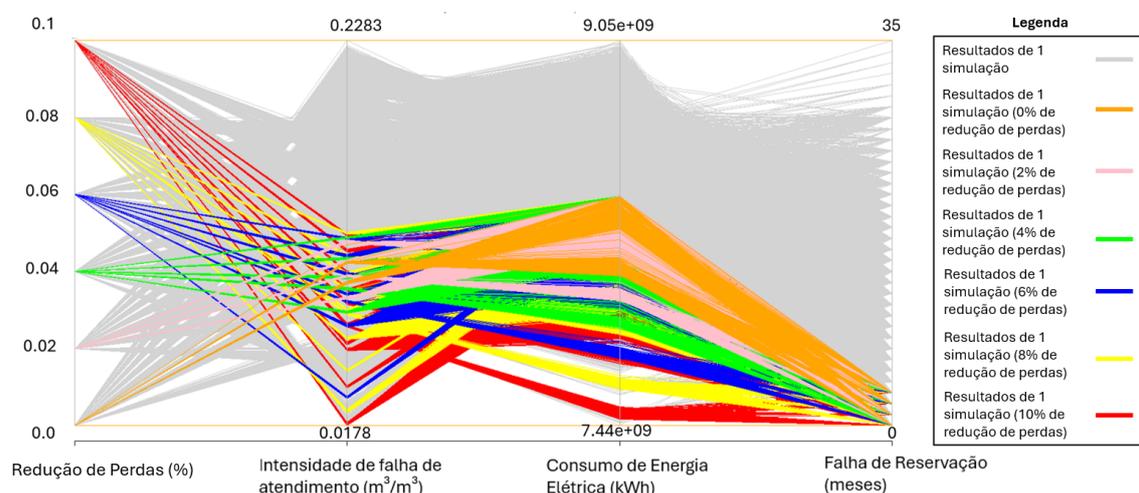


Figura 5.13 – Simulações que atenderam ao critério de desempenho dos objetivos separados pela redução de perdas.

De forma análoga, foram agregadas as informações de crescimento da demanda as simulações selecionadas. Na Tabela 5.17, também se identifica a participação de um maior número de simulações nas faixas onde o crescimento da demanda é menor. A partir de um

crescimento de 1,8% da demanda, nenhum cenário se enquadra nos critérios, revelando que ações para a redução do crescimento de demanda são importantes para que se atendam aos critérios estabelecidos. Isso é mais bem observado na Figura 5.14, onde foram discriminadas as simulações selecionadas por crescimentos de demanda.

Tabela 5.17 - Simulações pertencentes a cada Alternativa de Abastecimento por crescimento da demanda.

Crescimento de Demanda	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
	Simulações	Relação	Simulações	Relação	Simulações	Relação
1.0%	5066	14%	1135	3%	5403	15%
1.2%	3554	10%	414	1%	4112	11%
1.4%	2255	6%	16	0%	2312	6%
1.6%	1075	3%	0	0%	725	2%
1.8%	0	0%	0	0%	0	0%
2.0%	0	0%	0	0%	0	0%

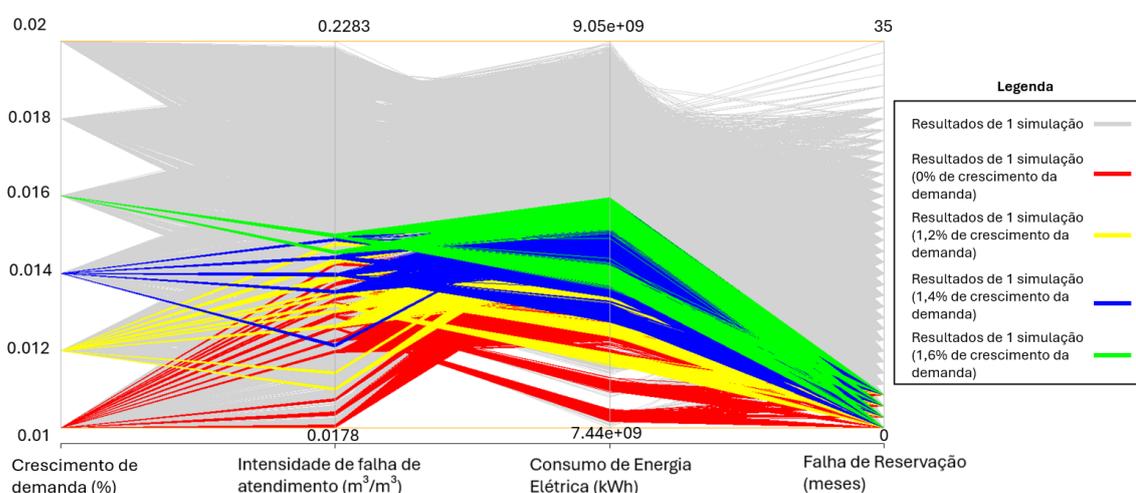


Figura 5.14 - Simulações que atenderam ao critério de desempenho dos objetivos separados pelo crescimento de demanda.

Conclui-se, através da análise multiobjetivo que em todas as condições, com ou sem redução de perdas, a Alternativa 3 de abastecimento é a que se mostra mais favorável aos critérios elencados, tendo como a Alternativa 1 a segunda melhor opção. De toda forma, essa é a avaliação para todas as áreas de serviço em conjunto. Podemos fazer uma avaliação mais detalhada e verificar qual o comportamento do objetivo Intensidade de não Atendimento nas ASs. Esse objetivo reflete diretamente o impacto de cada Alternativa sobre as ASs. Através

das Tabela 5.18, através dos valores em negrito, conseguimos observar quais as AS mais afetadas.

Tabela 5.18 – Resultados do objetivo intensidade de falha de atendimento por área de serviço.

Abastecimento	Área de serviço	Intensidade falha de atendimento
Alternativa 1	AS1	0,350
	AS2	0,047
	AS3	0,047
	ASE1	0,049
	ASE2	0,229
	ASE3	0,227
	Alternativa 2	AS1
AS2		0,094
AS3		0,082
ASE1		0,097
ASE2		0,123
ASE3		0,122
Alternativa 3	AS1	0,373
	AS2	0,371
	AS3	0,041
	ASE1	0,042
	ASE2	0,250
	ASE3	0,248

Constata-se na Tabela 5.18 que a AS 1 é a mais prejudicada na Alternativa 1 de abastecimento. Na Alternativa 2, as ASEs 1 e 2 possuem os maiores índices. Já na Alternativa 3, as ASs 1 e 2 são as maiores prejudicadas. Um ponto em comum dessas duas condições é notar que nas Alternativas 1 e 3, a AS1 é dependente exclusivamente da ETA.BSB.001.

O objetivo de Falhas de Reservatórios trata todos os reservatórios igualmente. Ou seja, uma falha observada no Lago Paranoá terá o mesmo impacto que uma falha no Lago Corumbá IV. Dadas as considerações e simplificações utilizadas nas representações de entradas, saídas e limites operacionais, o único reservatório que foi sensibilizado durante as simulações foi o do Descoberto. Logo, todas as falhas apresentadas dizem respeito a esse reservatório.

Além da análise multiobjetivo apresentada, ressalta-se que o produto entregue pela companhia de saneamento é água, apoiado pelo 6º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (UN, 2015), e que se deve assegurar a disponibilidade desse bem. Nesse caso, o consumidor deve ser o menor prejudicado em caso de restrição hídrica. Desse modo, o principal objetivo, a ser avaliado independentemente, torna-se a Intensidade de Falha de Atendimento.

Agora, ao se submeter os resultados das simulações apenas ao critério de Intensidade de Falha de Atendimento, há uma inversão da classificação favorável das alternativas de abastecimento. Retornando-se a Tabela 5.15, verifica-se que a Alternativa de abastecimento 2 passa a ser a mais interessante, pois apresenta o objetivo de intensidade de falha em 0,103, contra 0,129 e 0,138 das Alternativas 1 e 2, respectivamente.

Então, já se observa que a depender dos objetivos da companhia de saneamento, pode-se escolher outra alternativa de abastecimento, prevalecendo a escolha por reduzir o impacto aos consumidores.

Então, após a seleção de uma alternativa de abastecimento que atenda aos critérios estabelecidos, através da avaliação gráfica (ver Figura 5.15), pode-se examinar todas as áreas de serviço em conjunto e verificar de maneira global, o comportamento de cada cenário.

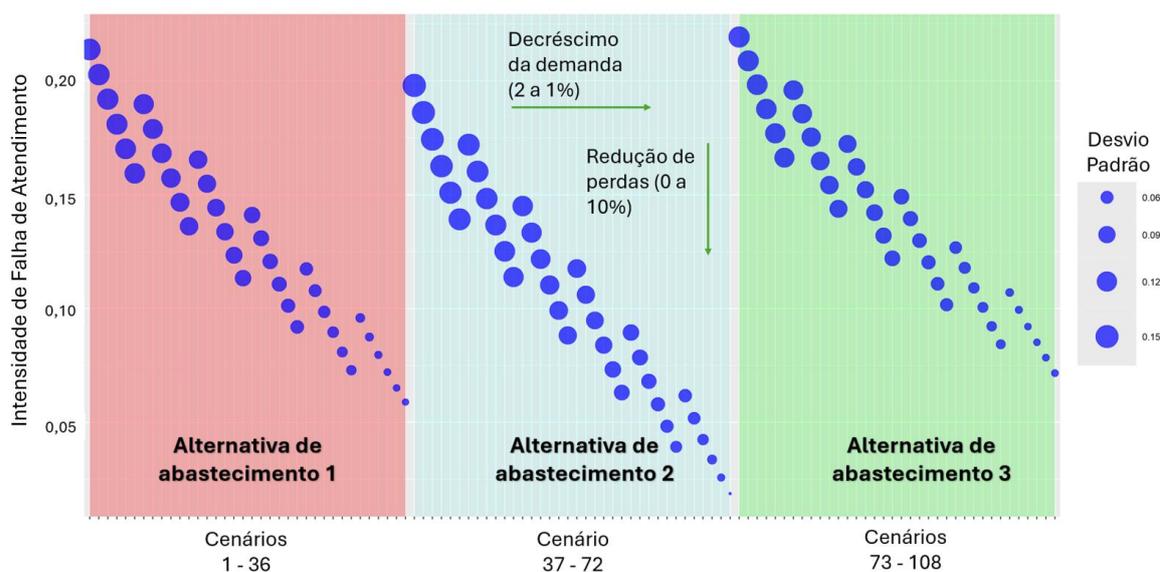


Figura 5.15 - Comparativo das intensidades de falha de atendimento médios dos cenários nas 3 alternativas de abastecimento.

Na Figura 5.15, cada ponto azul representa a simulação de um cenário submetido a 1 mil variações de séries climáticas (vazões afluentes e evaporação), onde o seu centro representa a média de 40 anos da intensidade de falha de atendimento e o seu diâmetro representa o desvio padrão das intensidades, dentre as 1.000 séries de variação climáticas simuladas para cada cenário. No conjunto de 36 cenários por alternativa de abastecimento, é possível observar como cenários com redução de perdas maiores e crescimento da demanda populacional menores reduzem a intensidade de falhas de atendimento, questão detalhada na análise dos resultados.

Através da análise gráfica (ver Figura 5.15), nota-se que a redução em 0,2% da expectativa de crescimento de demanda anual, resulta em uma maior redução da Intensidade de Falha de Atendimento que 2% de redução de perdas. Ou seja, o impacto da redução na demanda é mais efetivo que a redução das perdas, demonstrando a relevância da incerteza no crescimento da demanda e também de ações que possam contê-lo.

Além da capacidade da companhia de abastecimento de água fazer a gestão para a redução de perdas, podem ser trabalhadas a redução do crescimento da demanda das Áreas de Serviço. Assim, devem ser incentivadas ações e campanhas educacionais para fomentar o consumo consciente da água a longo prazo, visando alcançar padrões de consumo

sustentáveis e condizentes com a realidade local de disponibilidade hídrica. Isso pode ser complementado, através de imposições (pelo poder público) de condicionantes construtivas mais exigentes em novos loteamentos, com a instalação de dispositivos que economizem água.

Adicionalmente, pode-se avaliar graficamente cada alternativa de abastecimento e avaliar o comportamento temporal da intensidade de falhas de atendimento. Os gráficos a seguir, Figura 5.16 a Figura 5.24, apresentam as médias anuais das intensidades de falha de atendimento de cada cenário e cada cor de linha representa um cenário diferente. Para cada alternativa de abastecimento, é possível observar o ano em que provavelmente se iniciará o período crítico, do ponto de vista de uma maior intensidade de falhas de atendimento (ver Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18). Ao passo de tempo anual, tende-se a iniciar o crescimento da intensidade de não atendimento das áreas das Áreas de Serviço, iniciando pelos cenários mais pessimistas, onde não há redução de perdas e ocorre um maior crescimento da demanda.

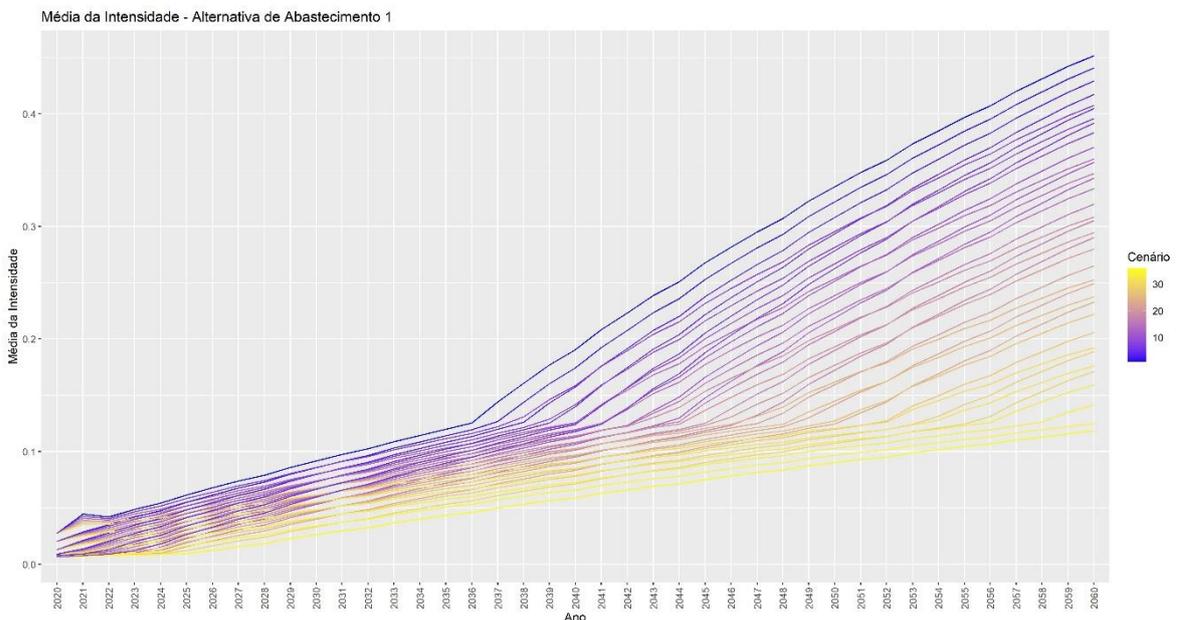


Figura 5.16 - Intensidade de falha de atendimento anual média dos cenários na alternativa de abastecimento 1.

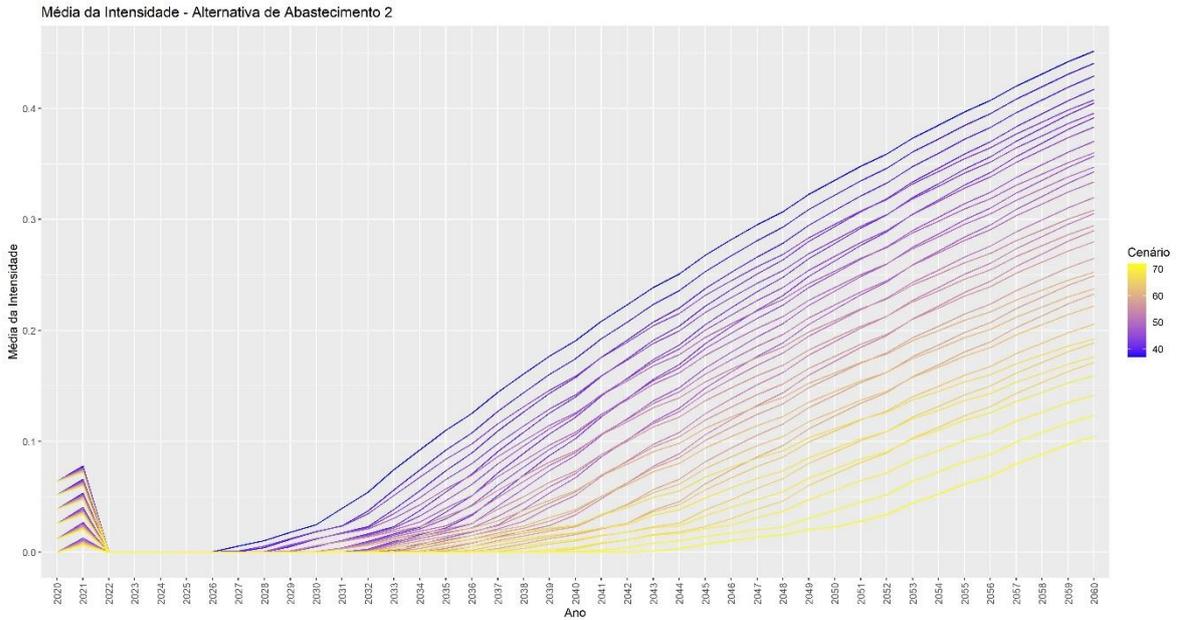


Figura 5.17 - Intensidade de falha de atendimento anual média dos cenários na alternativa de abastecimento 2.

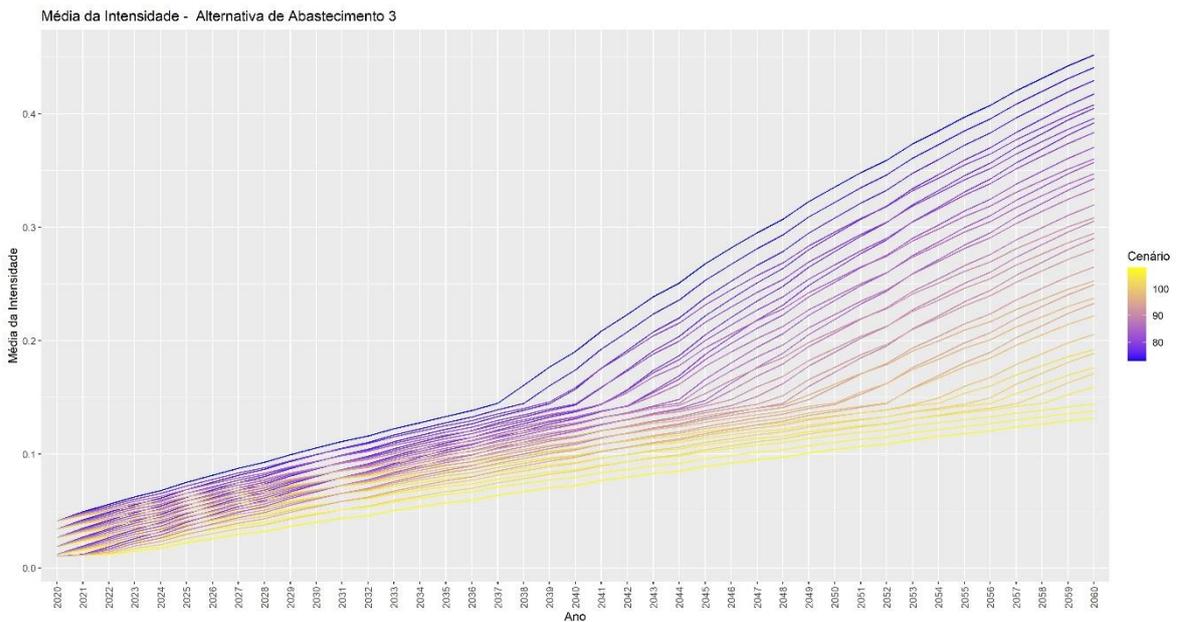


Figura 5.18 - Intensidade de falha de atendimento anual média dos cenários na alternativa de abastecimento 3.

Nota-se na Figura 5.17, Alternativa 2 de abastecimento, que a partir do ano de 2026 se iniciam as falhas de abastecimento. Essas falhas se iniciam nos cenários com parâmetros mais críticos, ou seja, os com menores reduções de perdas e maiores expectativas de crescimento de demanda. Nessa mesma alternativa, observa-se que em 2020 e 2021, foram

registradas falhas, pois na simulação a ETA.COR.001 apenas se tornou disponível em 2022, de forma a complementar o abastecimento.

Para uma análise mais específica, foi pormenorizada a observação ao nível das áreas de serviço, no contexto da alternativa de abastecimento 2 e avaliada a intensidade de falhas em cada uma delas, conforme Figura 5.19 à Figura 5.24.

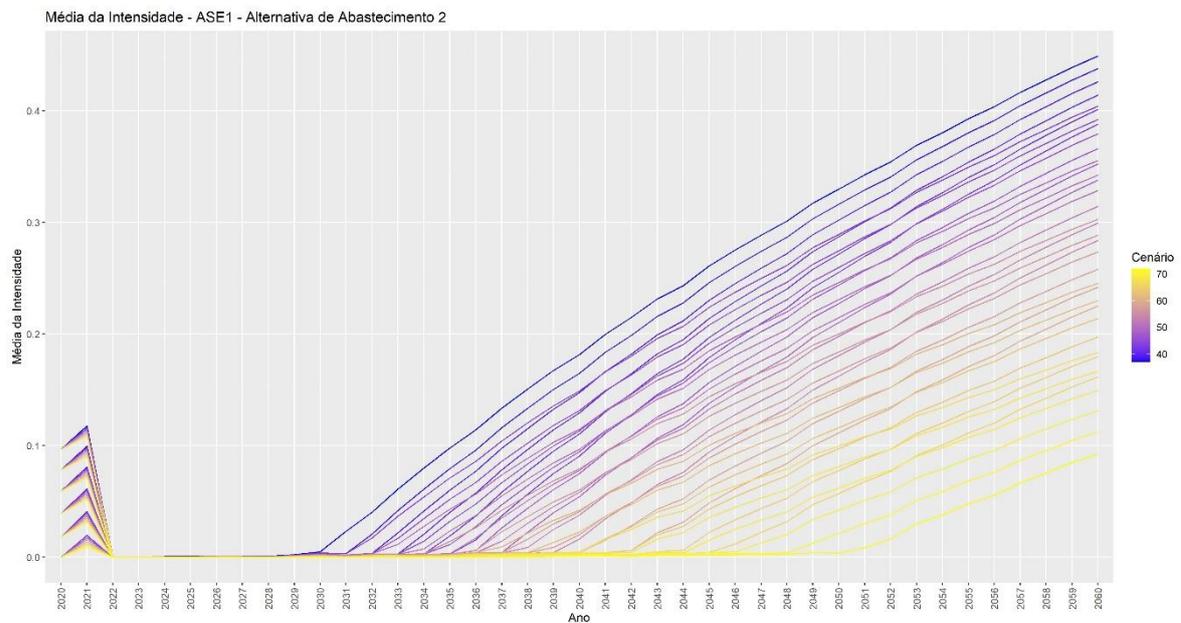


Figura 5.19 – Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço Exclusiva 1 (Alternativa de abastecimento 2).

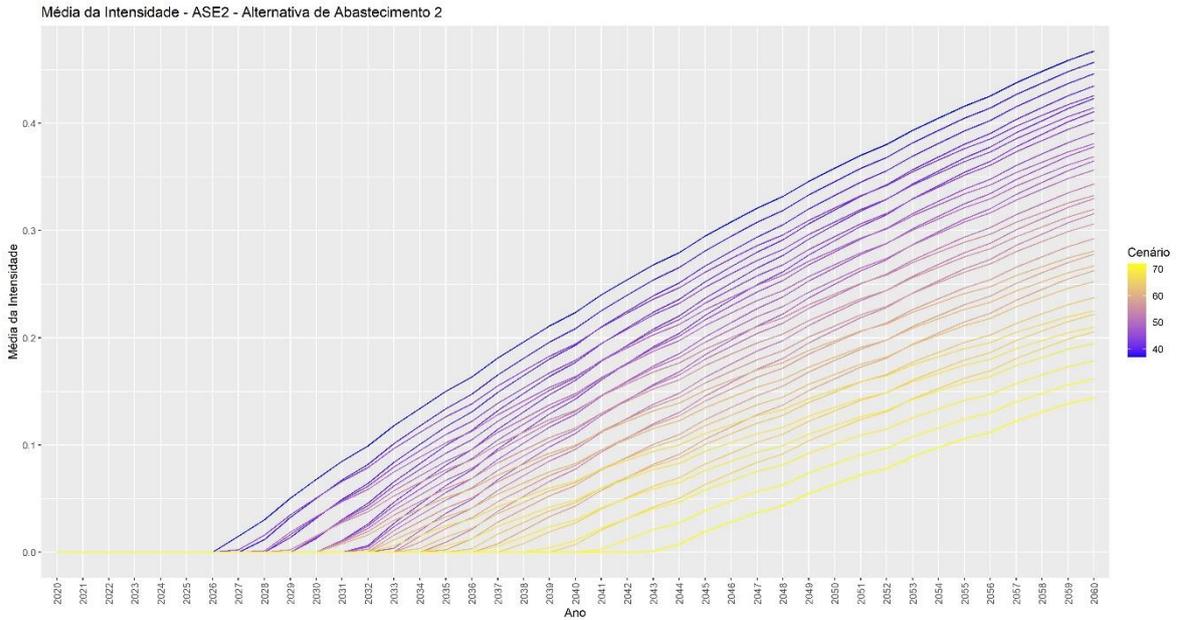


Figura 5.20 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço Exclusiva 2 (Alternativa de abastecimento 2).

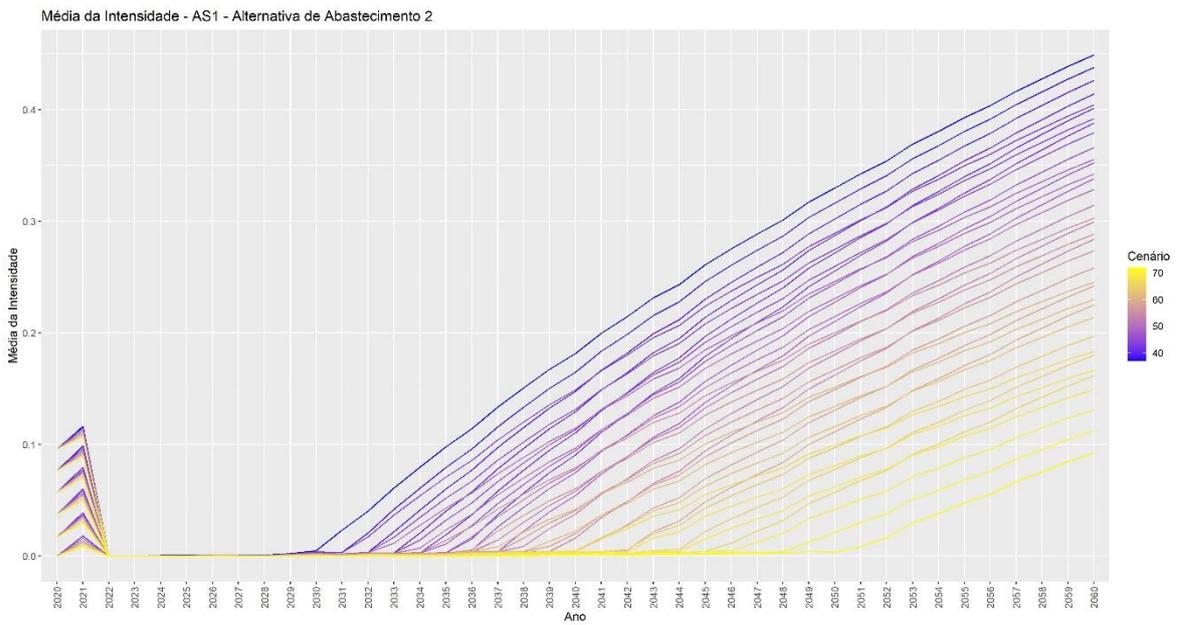


Figura 5.21 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço 1 (Alternativa de abastecimento 2).

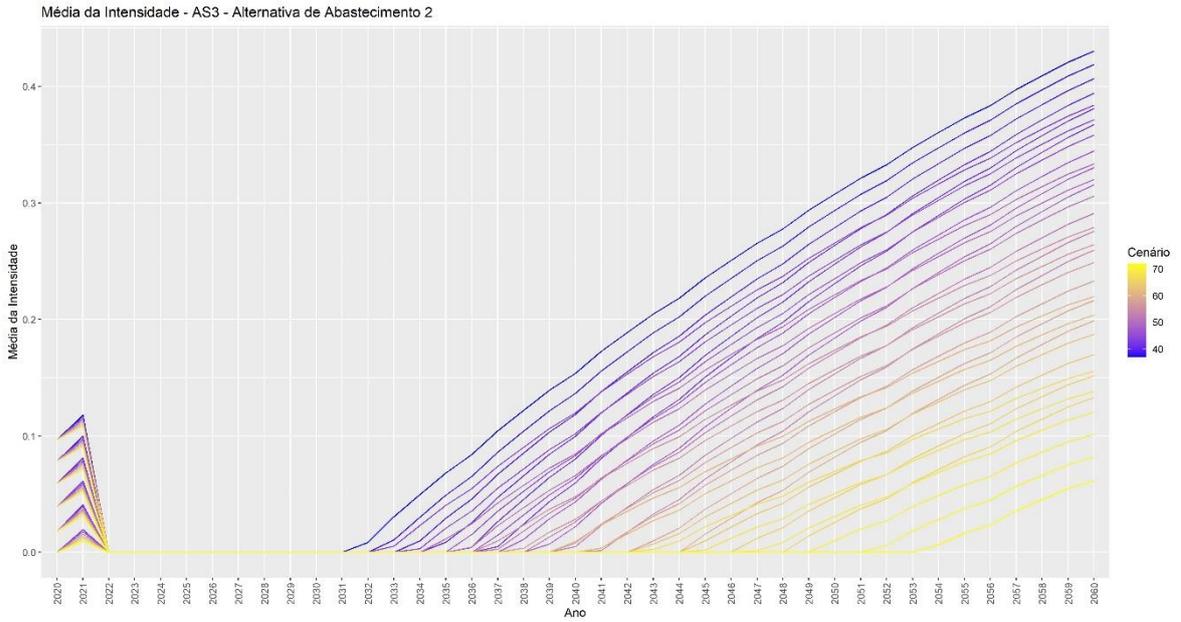


Figura 5.22 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço 3 (Alternativa de abastecimento 2).

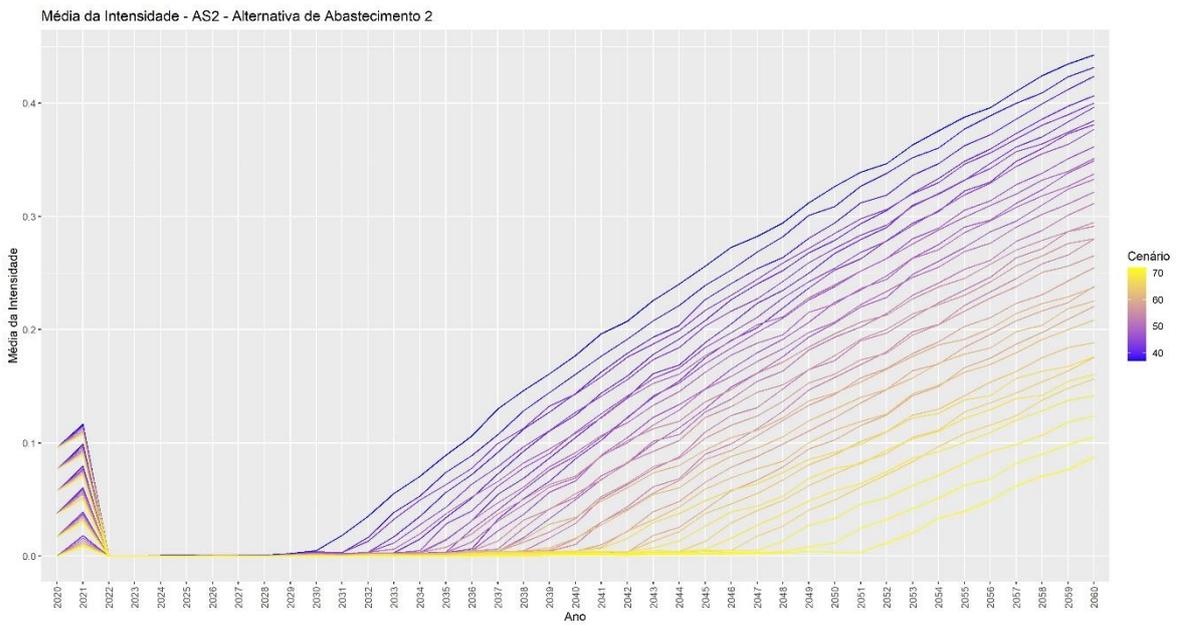


Figura 5.23 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço 2 (Alternativa de abastecimento 2).

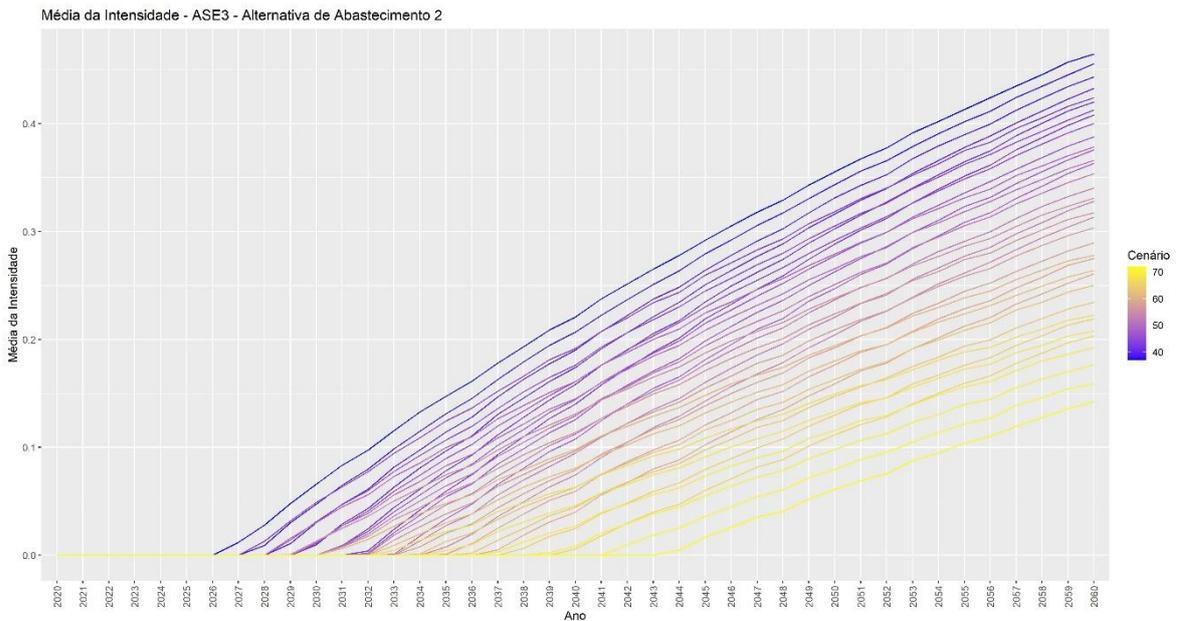


Figura 5.24 - Intensidade de falha de atendimento anual média na Área de Serviço Exclusiva 3 (Alternativa de abastecimento 2).

Era previsto que para cenários cuja realização de investimentos em redução de perdas e um menor crescimento de demanda resultasse em um início mais tardio dos problemas de intensidade de falhas de abastecimento. Essa hipótese é evidenciada na Tabela 5.19, diferenciando-os através da classificação de pessimista e otimista.

Tabela 5.19 - Data inicial comparativa entre áreas de serviço.

Área de serviço	Início das falhas (pessimista)	Início das falhas (otimista)
Exclusiva 1	2030	2050
Exclusiva 2	2026	2043
Exclusiva 3	2026	2043
1	2030	2050
2	2030	2051
3	2031	2053

6 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou conceber e aplicar uma metodologia simplificada para planejamento de longo prazo de sistemas hídricos urbanos de abastecimento de água. A metodologia foi aplicada no Distrito Federal e apresentou-se viável, pois com ajustes pontuais na topologia do sistema e em limites operacionais, além da utilização de informações já incorporadas pela companhia de saneamento, permite-se a avaliação de alternativas operacionais diferentes.

Quanto aos objetivos específicos do trabalho, foram identificados e avaliados o desempenho das alternativas quando comparados os objetivos para cada alternativas, resultando na avaliação e seleção da alternativa mais favorável. A principal relação observada entre os objetivos (sinergia) foi a que resultados de intensidades de falha de atendimento reduzidas são observadas em simulações com um maior consumo de energia elétrica.

Em relação às avaliações das alternativas de abastecimento, conclui-se que:

- A Alternativa de Abastecimento 3 é condição que atende melhor, simultaneamente, aos critérios de desempenho estabelecidos aos 3 objetivos;
- Enquanto às alternativas de abastecimento 1 e 3 apresentam simulações que atendem aos critérios de desempenho definidos, a Alternativa 2 só atende a partir de uma redução de perdas reais de 6%, ou seja, com a utilização atual dos mananciais, sem uma redução nas perdas reais, não é viável a seleção dessa alternativa;
- A partir de uma expectativa de crescimento de 1,8% da demanda, nenhum cenário se enquadra nos critérios;
- Enquanto a área de serviço 1 estiver vinculada à ETA Brasília, haverá uma maior intensidade nas falhas de atendimento, como é o caso das alternativas de abastecimento 1 e 3;
- Selecionando-se apenas o objetivo de intensidade de falha de atendimento, a Alternativa 2 passa a ser a mais interessante, reforçando a importância da definição dos objetivos prioritários por parte da concessionária de abastecimento;
- O impacto da redução na demanda é mais efetivo que a redução das perdas

A metodologia proposta pode ser aplicada em sistemas de abastecimento de outras companhias de saneamento, além da Caesb, através do estabelecimento de critérios claros

para a definição de políticas de alternativas de abastecimento. As simplificações apresentadas tendem a facilitar o aceite e internalização operacional da metodologia nas empresas, dada a necessidade de se estabelecer um planejamento frente a escassez de dados.

O estudo destacou a importância que as ações direcionadas à redução no crescimento da demanda possuem frente à redução da intensidade de falhas de atendimento.

A influência da taxa de crescimento de demanda e da redução de perdas reforça a importância do incentivo às ações educativas que visem o uso racional da água, pois assim, adia-se o início das falhas de atendimento à Áreas de Serviço.

A utilização do WEAP facilita a compreensão das condições operacionais definidas, pois é possível transitar entre a versão esquemática do modelo e os dados de entrada, simplificando as alterações. Entretanto, apesar da grande quantidade e variedade de resultados gráficos, a utilização destes pela própria interface do programa se torna morosa, não se mostrando muito práticos para a interpretação dos objetivos propostos. Por este motivo, decidiu-se pela elaboração de gráficos exportando-se os dados e os tratando através da linguagem R.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o estudo de caso, é necessário um refinamento do balanço hídrico dos reservatórios de acumulação para a representação mais adequada da operação normal, tendo em vista que só houve sensibilização do Reservatório do Descoberto. A subdivisão em uma quantidade maior de áreas de serviço permitiria abordar diretamente as regiões mais críticas do sistema de abastecimento, a possibilidade de áreas mais críticas serem agrupadas com áreas com uma folga de atendimento maior. Avaliando-se cada área de serviço de forma pormenorizada, podem ser estudadas novas manobras operacionais com alguma alteração em algum ano específico e refeitas as simulações.

As condições estáticas de abastecimento são limitações da metodologia, já que qualquer alteração só pode ser realizada, ou definida, após a avaliação final dos resultados e iniciada novamente as simulações. Caso interesse do usuário, faz-se necessário uma intervenção nos critérios de prioridade de cada cenário das alternativas de abastecimento para a alteração deles. Não obstante, ainda assim será necessária a adequação dos *scripts* utilizados para a geração dos cenários, para então executar as simulações. Uma grande melhoria da metodologia seria a implementação de políticas adaptativas no decorrer da simulação, utilizando-se as ferramentas apresentadas.

A inclusão de um indicador de custos, envolvendo os custos operacionais, como de produtos químicos, custo de pessoal, manutenção, e da própria energia elétrica, discretizados por unidade de tratamento, trariam um grande avanço para a metodologia. O custo da distribuição dessa água está diretamente vinculado ao ponto de entrega dessa água, refletindo em uma alteração do custo a depender da alternativa de abastecimento. Esse tipo de informação só será possível quando a companhia de possuir a apropriação desses custos nas respectivas unidades. Essa é uma sugestão para o desenvolvimento de outra metodologia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADASA. (2017). “RESOLUÇÃO N°03, DE 16 DE MARÇO DE 2017”. Brasília, DF, 4p.
- ADASA. (2022). “Outorga n.º 254/2022 - ADASA/SRH/COU”. Brasília, DF, 4p.
- ADASA. (2023a). “RESOLUÇÃO N° 24, DE 20 DE JULHO DE 2023.”. Brasília, DF, 4p.
- ADASA. (2023b). “RESOLUÇÃO N° 32, DE 21 DE DEZEMBRO DE 2023.”. Brasília, DF, 5p.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2024) “Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual”. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portais-centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjunturainforme2023.pdf>>. Acesso em 01/07/2024.
- Araújo, B. M. (2023). *Explorando Abordagens Adaptativas Resistentes a Incertezas Profundas: Uma Aplicação ao Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p.
- Araújo, B. M., Gold, D. F., Lau, L. B., Reed, P. M. e Alves, C. M. (2024). “Exploring Equity Challenges within Deeply Uncertain Water Supply Investment Pathways in the Federal District of Brazil”. In: *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(8), 04024030.
- Azevedo Neto, J. M. D., Fernandez, M. F., Araujo, R. D. e Ito, A. E. (1998). *Manual de hidráulica*, Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 8ª Edição.
- Basheer, M., Nechifor, V., Calzadilla, A., Siddig, K., Etichia, M., Whittington, D., Hulme, D e Harou, J. J. (2021). “Collaborative management of the Grand Ethiopian Renaissance Dam increases economic benefits and resilience”. In: *Nature Communications*, 12(1), 5622.
- Basheer, M., Nechifor, V., Calzadilla, A., Gebrechorkos, S., Pritchard, D., Forsythe, N., Gonzalez, J. M., Sheffield, J., Fowler, H. J. e Harou, J. J. (2023). “Negotiating Nile infrastructure management should consider climate change uncertainties”. In: *Nature Climate Change*, 1-3.
- Bojórquez-Tapia, L. A., Eakin, H., Reed, P. M., Miquelajauregui, Y., Grave, I., Merino-Benítez, T., e Molina-Pérez, E. (2022). “Unveiling uncertainties to enhance sustainability transformations in infrastructure decision-making”. In: *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 55, 101172.

- 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., Guillod, B. P. (2018). "Risk, Robustness and Water Resources Planning Under Uncertainty". In: *Earth's Future*, 6(3), 468–487.
- Brambilla, M. (2016). *Análise econômica de cenários de operação de reservatórios considerando o hidrograma ambiental para o baixo curso do Rio São Francisco*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador. 157f.
- Brockway, A. M., Wang, L., Dunn, L. N., Callaway, D. e Jones, A. (2022). “Climate-aware decision-making: lessons for electric grid infrastructure planning and operations”. In: *Environmental Research Letters*, 17(7), 073002.
- Brown, C., Steinschneider, S., Ray, P., Wi, S., Basdekas, L. e Yates, D. (2019). *Decision Scaling (DS): decision support for climate change. Decision making under deep uncertainty: From theory to practice*, 255-287.
- Brown, C., Boltz, F., Freeman, S., Tront, J. e Rodriguez, D. (2020). “Resilience by design: A deep uncertainty approach for water systems in a changing world”. In: *Water security*, 9, 100051.
- Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, M. T., Scherzer, A., Tramberend, S., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, W. e Wiberg, D. (2016). *Water futures and solution: fast track initiative (final report)*. IIASA, Laxenburg, Austria.
- Caesb - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2021). *Plano de Exploração de Serviços da Caesb - Volume 1 Tomo 1/6*. Brasília, DF, 18p.
- Caesb - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2024). *Relatório de indicadores da Caesb – 2024*. Disponível em: <https://www.caesb.df.gov.br/images/arquivos_pdf/arquivos_Lai/Relatorio-Indicadores-Desempenho2024.pdf>. Acesso em 20/04/2024.
- Cagece - Companhia de Água e Esgoto do Ceará (2022). *Cagece destaca a realidade de escassez hídrica no estado apesar das chuvas*. Disponível em: <<https://www.cagece.com.br/comunicacao/noticias/cagece-destaca-a-realidade-de-escassez-hidrica-no-estado-apesar-das-chuvas/>>. Disponível em 03/07/2024.
- Castro, C. M. S. N. (2019). *Emprego de indicadores e índices de sustentabilidade na avaliação de medidas emergenciais de gestão da água: caso da bacia do Rio*

- Descoberto, DF. Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 110f.
- Codeplan - Companhia de Planejamento do Distrito Federal (2022). *Cenários Demográficos do Distrito Federal por Região Administrativa: 2020-2030*. Disponível em: <<https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2021/12/Estudo-Projecoes-populacionais-para-as-Regioes-Administrativas-do-Distrito-Federal-2020-2030-Resultados.pdf>>. Acesso em 08/07/2023.
- Cook, C. e Bakker, K. (2012). *Water security: Debating an emerging paradigm. Global environmental change*, 22(1), 94-102.
- Deltares (2013). *River Basin Simulation Model RIBASIM Version 7.00 User Manual*. Delft, Holanda.
- DHI - Danish Hydraulic Institute (2023). *MIKE HYDRO Basin User Guide*. Hørsholm, Dinamarca.
- DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (1995). “Portaria nº 575, de 15 de dezembro de 1995”. Brasília, DF. Diário Oficial, nº 243, 21588.
- EPA - United States Environmental Protection Agency (2017). *Water System Partnerships: State Programs and Policies Supporting Cooperative Approaches For Drinking Water Systems*. 63p.
- Farrokhzadeh, S., Hashemi Monfared, S. A., & Azizyan, G. (2020). “Sustainable water resources management in an arid area using a coupled optimization-simulation modeling”. In: *Water*, 12(3), 885.
- GDF (2017a). *Plano integrado de enfrentamento à crise hídrica*. Brasília, DF, 91p.
- GDF (2017b). *Plano Distrital de Saneamento Básico*. Brasília, DF, 484p.
- GDF (2024). *Administrações Regionais*. Disponível em: <<https://segov.df.gov.br/category/administracoes-regionais/>>. Acesso em 02/06/2024.
- 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.
- Gold, D. F., Reed, P. M., Trindade, B. C. e Characklis, G. W. (2019). “Identifying actionable compromises: Navigating multi-city robustness conflicts to discover cooperative safe operating spaces for regional water supply portfolios”. In: *Water Resources Research*, 55.

- Gold, D. F., Reed, P. M., Gorelick, D. E. e Characklis, G. W. (2022). “Power and pathways: Exploring robustness, cooperative stability, and power relationships in regional infrastructure investment and water supply management portfolio pathways”. In: *Earth's Future*, 10.
- Gorelick, D. E., Gold, D. F., Reed, P. M. e Characklis, G. W. (2022). “Impact of inter-utility agreements on cooperative regional water infrastructure investment and management pathways”. In: *Water Resources Research*, 58.
- Gorelick, D. E., Gold, D. F., Reed, P. M., e Characklis, G. W. (2023). “Designing Water Utility Cooperative Agreements: Lessons Learned in North Carolina”. In: *Journal-American Water Works Association*, 115(1), 32-40.
- Goyburo, A., Rau, P., Lavado-Casimiro, W., & Buytaert, W. (2023). “Assessment of present and future water security under anthropogenic and climate changes using WEAP model in the Vilcanota-Urubamba catchment, Cusco, Peru”. In: *Water*, 15(7), 1439.
- Hadjimichael, A., Quinn, J. D., Wilson, E., Reed, P., Basdekas, L., Yates, D. e Garrison, M. (2020). “Defining robustness, vulnerabilities, and consequential scenarios for diverse stakeholder interests in institutionally complex river basins”. In: *Earth's Future*, 7.
- Hamilton, A. L., Zeff, H. B., Characklis, G. W. e Reed, P. M. (2022). “Resilient California water portfolios require infrastructure investment partnerships that are viable for all partners”. In: *Earth's Future*, 10.
- Herman, J. D., Reed, P. M., Zeff, H. B. e Characklis, G. W. (2015). “How should robustness be defined for water systems planning under change?”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(10), 04015012.
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2003). Parecer técnico n° 017/2003 - COLIC/CGLIC/DILIQ/IBAMA. Brasília, DF. 4p
- 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.
- Kingsborough, A., E. Borgomeo e J.W. Hall (2016) “Adaptation pathways in practice: mapping options and trade-offs for London’s water resources”. In: *Sustainable Cities and Society* 27, 386-397.
- Kuhn, K. D. e Madanat, S. M. (2005). “Model uncertainty and the management of a system of infrastructure facilities”. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(5-6), 391-404.

- Kumar, P. (2015). "Hydrocomplexity: Addressing water security and emergent environmental risks". In: *Water Resources Research*, 51(7), 5827-5838.
- Kwakkel, J. H., Haasnoot, M. e Walker, W. E. (2016a). "Comparing robust decision-making and dynamic adaptive policy pathways for model-based decision support under deep uncertainty". In: *Environmental Modelling & Software*, 86, 168–183.
- Kwakkel, J. H., Walker, W. E. e Haasnoot, M. (2016b). "Coping with the Wickedness of Public Policy Problems: Approaches for Decision Making under Deep Uncertainty". In: *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Lempert, R. J., Popper, S. W. e Bankes, S. C. (2003). *Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, long-term policy analysis*. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Shneider, S. H. e Taylor, W. W. (2007). "Complexity of coupled human and natural systems". In: *Science*, 317(5844), 1513-1516.
- 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.
- Matalas, N. C. e Fiering, M. B. (1977). *Water-resource systems planning. Climate, Climatic Change, and Water Supply*. Studies in Geophysics, National Academy of Sciences, Washington, D. C., 99-110.
- Monsalve-Herrera, D. J. (2013). *Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM 146/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127p.
- 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.
- Notisso, P. F. (2020). *Aplicação do modelo WEAP na avaliação de alocação de água do reservatório dos Pequenos Libombos, Moçambique*. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 72f.
- Pahl-Wostl, C. (2007). "Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change". In: *Water Resources Management*, 21(1), 49-62.

- Power, D. J. (1997). “What is a DSS”. In: *DSstar, The On-line executive journal for data-intensive decision support*, 1(3).
- 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.
- Sabesp - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (2015). *CHESS - Crise Hídrica, Estratégias e Soluções da Sabesp para a Região Metropolitana de São Paulo*. São Paulo, SP, 95p.
- Saleem, A., Mahmood, I., Sarjoughian, H., Nasir, H. A., & Malik, A. W. (2021). “A Water Evaluation and Planning-based framework for the long-term prediction of urban water demand and supply”. In: *Simulation*, 97(5), 323-345.
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*. Open SUNY Textbooks [Imprint].
- 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.
- Silva, F. B. (2019). *Modelagem hidrológica da bacia do rio Paracatu: avaliação do modelo WEAP como ferramenta de planejamento e gestão de recursos hídricos*. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 136 f.
- Silva, E. P. D., Minoti, R. T., Alves, C. D. M. A., Volken, N. J. e Figueroa, F. E. V. (2024). “Evaluation of collective water rights allocation scenarios using the WEAP simulation model in a region of water use conflicts: the case of Formoso River Basin–Tocantins state/Brazil”. In: *RBRH*, 29, e13.
- 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. 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.
- 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.

- Thorton, J., Sturm, R., Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control*. 2ª edição, USA, McGraw-Hill, .650p
- UN – United Nations (2015). *A/RES/70/1 - Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York, NY, 35p
- UNEP - United Nations Environment Programme (2023). *Adaptation Gap Report 2023*. Disponível em: < <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2023>>. Acesso em 01/07/2024.
- UNW - United Nations Water (2013). *Water security & the global water agenda: A UN-water analytical brief*. United Nations University (UNU).
- UNW - United Nations Water (2023). *UN World Water Development Report 2023*. Disponível em: < <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023>>. Acesso em 06/04/2024.
- 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.
- WASY. (2003). *WBalMo 2.1: Interactive simulation system for planning and management in river basins. User’s manual*. Berlim, Alemanha.
- WEAP (2023). *Inflows And Outflows Of Water*. Disponível em: <https://www.weap21.org/webhelp/index.html#Inflows_and_Outflows_of_Water.htm>. Acesso em 09/10/2023.
- WEF - World Economic Forum (2024). *The Global Risks Report 2024*. Disponível em: <https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2024.pdf>. Acesso em 01/07/2024.
- Zeff, H. B., J. D. Herman, P. M. Reed e G. W. Characklis (2016), “Cooperative drought adaptation: Integrating infrastructure development, conservation, and water transfers into adaptive policy pathways”, In: *Water Resour. Res.*, 52, 7327– 7346.

APÊNDICES

A - VAZÕES MÉDIAS ANUAIS PRODUZIDAS POR SISTEMA PRODUTOR

Mês	Ano	S. Descoberto	S. Torto / Santa Maria
1	2017	4.191,48	1.961,82
2	2017	3.881,53	2.019,71
3	2017	3.859,07	1.863,64
4	2017	3.847,17	1.917,80
5	2017	3.873,44	2.021,12
6	2017	3.854,35	1.919,24
7	2017	3.767,16	1.911,52
8	2017	3.908,20	2.158,19
9	2017	3.912,82	2.231,99
10	2017	3.782,55	2.566,41
11	2017	3.400,73	2.406,69
12	2017	3.388,52	2.344,71
1	2018	3.361,26	2.348,36
2	2018	3.411,64	2.412,83
3	2018	3.454,47	2.531,07
4	2018	3.309,21	2.473,65
5	2018	3.357,60	2.567,81
6	2018	3.437,38	2.648,15
7	2018	3.622,00	2.590,65
8	2018	3.645,60	2.752,48
9	2018	3.774,90	2.818,89
10	2018	3.714,10	2.712,60
11	2018	3.573,00	2.620,16
12	2018	3.835,60	2.618,00
1	2019	4.007,72	2.450,60
2	2019	4.039,10	2.574,33
3	2019	4.027,70	2.615,34
4	2019	3.912,00	2.727,72
5	2019	3.957,90	2.634,80
6	2019	3.943,28	2.656,98
7	2019	3.816,70	2.729,90
8	2019	4.000,57	2.931,06
9	2019	4.124,13	3.016,78
10	2019	4.021,73	3.082,12
11	2019	3.939,44	2.935,32
12	2019	3.914,05	2.770,89
1	2020	3.963,92	2.687,56
2	2020	3.944,57	2.792,70
3	2020	3.969,81	2.789,41

4	2020	3.933,35	2.688,60
5	2020	3.923,43	2.760,10
6	2020	3.990,94	2.805,54
7	2020	4.097,12	2.777,70
8	2020	4.196,50	2.755,74
9	2020	4.343,21	2.835,16
10	2020	4.358,21	2.871,03
11	2020	4.164,39	2.559,17
12	2020	4.344,42	2.591,84
1	2021	4.283,88	2.561,83
2	2021	4.181,07	2.563,65
3	2021	4.183,83	2.701,42
4	2021	4.196,15	2.769,98
5	2021	4.183,74	2.718,14
6	2021	4.235,72	2.795,03
7	2021	4.175,87	2.721,90
8	2021	4.329,11	2.783,38
9	2021	4.490,83	2.895,39
10	2021	4.267,96	2.831,97
11	2021	4.178,08	2.578,10
12	2021	3.987,55	2.582,07
1	2022	4.124,62	2.535,83
2	2022	4.261,09	2.744,31
3	2022	4.400,11	2.721,70
4	2022	4.427,47	2.782,38
5	2022	4.313,30	2.849,40
6	2022	4.235,45	2.878,85
7	2022	4.201,69	2.891,54
8	2022	4.342,01	3.023,97
9	2022	4.290,08	2.979,52
10	2022	4.479,36	2.827,38
11	2022	4.321,38	2.699,10
12	2022	4.376,14	2.714,87
PRODUÇÃO MÉDIA 2017-2022 (l/s)		3.993,95	2.619,58

B - CENÁRIOS SIMULADOS

CENÁRIO	ABASTECIMENTO	Crescimento Demanda	Redução de Perdas
1	Alternativa de abastecimento 1	2%	0%
2	Alternativa de abastecimento 1	2%	2%
3	Alternativa de abastecimento 1	2%	4%
4	Alternativa de abastecimento 1	2%	6%
5	Alternativa de abastecimento 1	2%	8%
6	Alternativa de abastecimento 1	2%	10%
7	Alternativa de abastecimento 1	1.8%	0%
8	Alternativa de abastecimento 1	1.8%	2%
9	Alternativa de abastecimento 1	1.8%	4%
10	Alternativa de abastecimento 1	1.8%	6%
11	Alternativa de abastecimento 1	1.8%	8%
12	Alternativa de abastecimento 1	1.8%	10%
13	Alternativa de abastecimento 1	1.6%	0%
14	Alternativa de abastecimento 1	1.6%	2%
15	Alternativa de abastecimento 1	1.6%	4%
16	Alternativa de abastecimento 1	1.6%	6%
17	Alternativa de abastecimento 1	1.6%	8%
18	Alternativa de abastecimento 1	1.6%	10%
19	Alternativa de abastecimento 1	1.4%	0%
20	Alternativa de abastecimento 1	1.4%	2%
21	Alternativa de abastecimento 1	1.4%	4%
22	Alternativa de abastecimento 1	1.4%	6%
23	Alternativa de abastecimento 1	1.4%	8%
24	Alternativa de abastecimento 1	1.4%	10%
25	Alternativa de abastecimento 1	1.2%	0%
26	Alternativa de abastecimento 1	1.2%	2%
27	Alternativa de abastecimento 1	1.2%	4%
28	Alternativa de abastecimento 1	1.2%	6%
29	Alternativa de abastecimento 1	1.2%	8%
30	Alternativa de abastecimento 1	1.2%	10%
31	Alternativa de abastecimento 1	1.0%	0%
32	Alternativa de abastecimento 1	1.0%	2%
33	Alternativa de abastecimento 1	1.0%	4%
34	Alternativa de abastecimento 1	1.0%	6%
35	Alternativa de abastecimento 1	1.0%	8%
36	Alternativa de abastecimento 1	1.0%	10%
37	Alternativa de abastecimento 2	2%	0%
38	Alternativa de abastecimento 2	2%	2%
39	Alternativa de abastecimento 2	2%	4%
40	Alternativa de abastecimento 2	2%	6%
41	Alternativa de abastecimento 2	2%	8%
42	Alternativa de abastecimento 2	2%	10%
43	Alternativa de abastecimento 2	1.8%	0%

44	Alternativa de abastecimento 2	1.8%	2%
45	Alternativa de abastecimento 2	1.8%	4%
46	Alternativa de abastecimento 2	1.8%	6%
47	Alternativa de abastecimento 2	1.8%	8%
48	Alternativa de abastecimento 2	1.8%	10%
49	Alternativa de abastecimento 2	1.6%	0%
50	Alternativa de abastecimento 2	1.6%	2%
51	Alternativa de abastecimento 2	1.6%	4%
52	Alternativa de abastecimento 2	1.6%	6%
53	Alternativa de abastecimento 2	1.6%	8%
54	Alternativa de abastecimento 2	1.6%	10%
55	Alternativa de abastecimento 2	1.4%	0%
56	Alternativa de abastecimento 2	1.4%	2%
57	Alternativa de abastecimento 2	1.4%	4%
58	Alternativa de abastecimento 2	1.4%	6%
59	Alternativa de abastecimento 2	1.4%	8%
60	Alternativa de abastecimento 2	1.4%	10%
61	Alternativa de abastecimento 2	1.2%	0%
62	Alternativa de abastecimento 2	1.2%	2%
63	Alternativa de abastecimento 2	1.2%	4%
64	Alternativa de abastecimento 2	1.2%	6%
65	Alternativa de abastecimento 2	1.2%	8%
66	Alternativa de abastecimento 2	1.2%	10%
67	Alternativa de abastecimento 2	1.0%	0%
68	Alternativa de abastecimento 2	1.0%	2%
69	Alternativa de abastecimento 2	1.0%	4%
70	Alternativa de abastecimento 2	1.0%	6%
71	Alternativa de abastecimento 2	1.0%	8%
72	Alternativa de abastecimento 2	1.0%	10%
73	Alternativa de abastecimento 3	2%	0%
74	Alternativa de abastecimento 3	2%	2%
75	Alternativa de abastecimento 3	2%	4%
76	Alternativa de abastecimento 3	2%	6%
77	Alternativa de abastecimento 3	2%	8%
78	Alternativa de abastecimento 3	2%	10%
79	Alternativa de abastecimento 3	1.8%	0%
80	Alternativa de abastecimento 3	1.8%	2%
81	Alternativa de abastecimento 3	1.8%	4%
82	Alternativa de abastecimento 3	1.8%	6%
83	Alternativa de abastecimento 3	1.8%	8%
84	Alternativa de abastecimento 3	1.8%	10%
85	Alternativa de abastecimento 3	1.6%	0%
86	Alternativa de abastecimento 3	1.6%	2%
87	Alternativa de abastecimento 3	1.6%	4%
88	Alternativa de abastecimento 3	1.6%	6%
89	Alternativa de abastecimento 3	1.6%	8%
90	Alternativa de abastecimento 3	1.6%	10%

91	Alternativa de abastecimento 3	1.4%	0%
92	Alternativa de abastecimento 3	1.4%	2%
93	Alternativa de abastecimento 3	1.4%	4%
94	Alternativa de abastecimento 3	1.4%	6%
95	Alternativa de abastecimento 3	1.4%	8%
96	Alternativa de abastecimento 3	1.4%	10%
97	Alternativa de abastecimento 3	1.2%	0%
98	Alternativa de abastecimento 3	1.2%	2%
99	Alternativa de abastecimento 3	1.2%	4%
100	Alternativa de abastecimento 3	1.2%	6%
101	Alternativa de abastecimento 3	1.2%	8%
102	Alternativa de abastecimento 3	1.2%	10%
103	Alternativa de abastecimento 3	1.0%	0%
104	Alternativa de abastecimento 3	1.0%	2%
105	Alternativa de abastecimento 3	1.0%	4%
106	Alternativa de abastecimento 3	1.0%	6%
107	Alternativa de abastecimento 3	1.0%	8%
108	Alternativa de abastecimento 3	1.0%	10%

C - SCRIPTS

C.1 Cálculo dos cenários no WEAP

```
Set W = CreateObject("WEAP.WEAPApplication")
For i = 1 To 108
W.ActiveArea = "Cen" & i
Call W.Calculate
Next
```

C.2 Exportação dos resultados no WEAP

```
Set W = CreateObject("WEAP.WEAPApplication")
For i = 1 To 108
W.ActiveArea = "Cen" & i

W.ResultSetting("Variable") = "Unmet Demand"
W.ResultSetting("Legend") = "Scenario"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_FalhaAtendimento.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\SistD"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_UD_SistD.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\SistToSmPa"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_UD_SistToSmPa.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\Gua"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_UD_Gua.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\SistSoPl"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_UD_SistSoPl.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\CanNb"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_UD_CanNb.csv"
```

W.ResultSetting("Branch") = "\\Demand Sites and Catchments\RecGamPkwSmRf2"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_UD_RecGamPkwSmRf2.csv"

W.ResultSetting("Variable") = "Transmission Link Flow"
W.ResultSetting("Legend") = "Scenario"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ResultSetting("Branch") = "\\Supply and Resources\Transmission Links\to
ETA_RDE\from R_Descoberto"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_TL_to ETA_RDE_from
R_Descoberto.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\\Supply and Resources\Transmission Links\to
ETA_LNT\from R_Paranoa"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_TL_to ETA_LNT_from
R_Paranoa.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\\Supply and Resources\Transmission Links\to
ETA_BSB\from Cap ETA BSB"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_TL_to ETA_BSB_from Cap
ETA BSB.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\\Supply and Resources\Transmission Links\to
ETA_COR\from R_Corumba"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_TL_to ETA_COR_from
R_Corumba.csv"

W.ResultSetting("Variable") = "Water Demand"
W.ResultSetting("Branch") = "\\Demand Sites and Catchments\
W.ResultSetting("Legend") = "Scenario"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_DemandaAgua.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\\Demand Sites and Catchments\SistD"

W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_D_SistD.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\SistToSmPa"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_D_SistToSmPa.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\Gua"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_D_Gua.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\SistSoPl"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_D_SistSoPl.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\CanNb"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_D_CanNb.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Demand Sites and Catchments\RecGamPkwSmRf2"
W.ResultSetting("Annual Total") = True
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_D_RecGamPkwSmRf2.csv"

W.ResultSetting("Variable") = "Reservoir Storage Volume"
W.ResultSetting("Legend") = "Scenario"
W.ResultSetting("Branch") = "\Supply and Resources\Local Reservoirs\R_Descoberto"
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_RSV_R_Descoberto.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Supply and Resources\Local Reservoirs\R_Paranao"
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_RSV_R_Paranao.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Supply and Resources\Local Reservoirs\R_Santa Maria"
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_RSV_R_Santa Maria.csv"
W.ResultSetting("Branch") = "\Supply and Resources\Local Reservoirs\R_Corumba"
W.ExportResults "C:\weapR\Resultados\Cenario" & i & "_RSV_R_Corumba.csv"

Next

C.3 Código para geração dos indicadores e gráficos no R

```
library(anytime)
library(tibble)
library(tidyr)
library(dplyr)
library(rlang)
library(ggplot2)
library(lubridate)
library(writexl)

setwd("F:/OneDrive - unb.br/Mestrado/Dissertação/Resultados")

#####Intensidade de não atendimento a demanda Sistema Descoberto#####
lista_dataframes <- list()

# Função para ler e processar os arquivos
processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_SistD" else "_D_SistD"
  nome3 <- ".csv"

  for (i in ids) {
    arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
    Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
    colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

    if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
    }

    Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
    df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
    lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
  }
}
```

```

}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorD <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorD <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorD %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorD %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

# Cálculo da Intensidade
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))

```

```

write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_ASE1.csv", row.names = FALSE)

# Criação do gráfico
ggplot(analise_Intensidade, aes(x = NomeCenario, y = Mean_Intensidade, size =
SD_Intensidade)) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario1", xmax = "Cenario36", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightcoral", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario37", xmax = "Cenario72", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightblue", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario73", xmax = "Cenario108", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill
= "lightgreen", alpha = 0.01) +
  geom_point(color = "blue", alpha = 0.7) +
  scale_size_continuous(range = c(1, 10)) +
  labs(x = "Cenário", y = "Média da Intensidade", title = "Intensidade de não atendimento -
ASE1") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))

ggsave(filename="Intensidade-ASE1.png", width=15, height=8)

mean_intensidade <- aggregate(Intensidade ~ NomeCenario + Year, data = combined_df,
FUN = mean)

mean_intensidade <- mean_intensidade %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  mutate(Grupo = case_when(
    Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Grupo1",
    Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Grupo2",
    Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Grupo3"
  ))
mean_intensidade$Year <- format(as.Date(mean_intensidade$Year), "%Y")

mean_intensidade$NomeCenarioNum <-
as.numeric(as.factor(mean_intensidade$NomeCenario))

```

```

# Criação do gráfico de linhas
ggplot(mean_intensidade, aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group =
NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE1", color
= "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE1-linha.png", width=15, height=8)

```

```

# Gráfico para Grupo 1

```

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo1"),
  aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE1 -
Alternativa de Abastecimento 1", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE1-linha-Cond1.png", width=15, height=8)

```

```

# Gráfico para Grupo 2

```

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo2"),
  aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE1 -
Alternativa de Abastecimento 2", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE1-linha-Cond2.png", width=15, height=8)

```

```

# Gráfico para Grupo 3

```

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo3"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +

```

```

geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE1 -
Alternativa de Abastecimento 3", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE1-linha-Cond3.png", width=15, height=8)

```

#####Intensidade de não atendimento a demanda Sistema Sobradinho Planaltina#####

Função para ler e processar os arquivos

```

processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_SistSoPl" else "_D_SistSoPl"
  nome3 <- ".csv"

  for (i in ids) {
    arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
    Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
    colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

    if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
    }

    Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
    df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
    lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
  }

  df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
  df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
  df_total
}

```

```

numeradorSO <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorSO <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorSO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorSO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_ASE3.csv", row.names = FALSE)

# Criação do gráfico
ggplot(analise_Intensidade, aes(x = NomeCenario, y = Mean_Intensidade, size =
SD_Intensidade)) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario1", xmax = "Cenario36", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightcoral", alpha = 0.01) +

```

```

geom_rect(aes(xmin = "Cenario37", xmax = "Cenario72", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightblue", alpha = 0.01) +
geom_rect(aes(xmin = "Cenario73", xmax = "Cenario108", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill
= "lightgreen", alpha = 0.01) +
geom_point(color = "blue", alpha = 0.7) +
scale_size_continuous(range = c(1, 10)) +
labs(x = "Cenário", y = "Média da Intensidade", title = "Intensidade de não atendimento -
ASE3") +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE3.png", width=15, height=8)

```

```

mean_intensidade <- aggregate(Intensidade ~ NomeCenario + Year, data = combined_df,
FUN = mean)

```

```

# Definir grupos de cenários

```

```

mean_intensidade <- mean_intensidade %>%
mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
mutate(Grupo = case_when(
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Grupo1",
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Grupo2",
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Grupo3"
))

```

```

mean_intensidade$Year <- format(as.Date(mean_intensidade$Year), "%Y")

```

```

# Criação do gráfico de linhas

```

```

ggplot(mean_intensidade, aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group =
NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE3", color
= "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE3-linha.png", width=15, height=8)

```

```

# Gráfico para Grupo 1

```

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo1"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE3 -
Alternativa de Abastecimento 1", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE3-linha-Cond1.png", width=15, height=8)

```

Gráfico para Grupo 2

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo2"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE3 -
Alternativa de Abastecimento 2", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE3-linha-Cond2.png", width=15, height=8)

```

Gráfico para Grupo 3

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo3"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE3 -
Alternativa de Abastecimento 3", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE3-linha-Cond3.png", width=15, height=8)

```

#####Intensidade de não atendimento a demanda Sistema Torto Santa Maria Paranoá#####

Função para ler e processar os arquivos

```

processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()

```

```

nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_SistToSmPa" else "_D_SistToSmPa"
nome3 <- ".csv"

for (i in ids) {
  arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

  if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  }

  Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
  df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
  lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorTO <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorTO <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorTO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorTO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

```

```

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

# Cálculo da Intensidade
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_ASE2.csv", row.names = FALSE)

# Criação do gráfico
ggplot(analise_Intensidade, aes(x = NomeCenario, y = Mean_Intensidade, size =
SD_Intensidade)) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario1", xmax = "Cenario36", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightcoral", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario37", xmax = "Cenario72", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightblue", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario73", xmax = "Cenario108", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill
= "lightgreen", alpha = 0.01) +
  geom_point(color = "blue", alpha = 0.7) +
  scale_size_continuous(range = c(1, 10)) +
  labs(x = "Cenário", y = "Média da Intensidade", title = "Intensidade de não atendimento -
ASE2") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE2.png", width=15, height=8)

```

```
mean_intensidade <- aggregate(Intensidade ~ NomeCenario + Year, data = combined_df,
FUN = mean)
```

```
mean_intensidade <- mean_intensidade %>%
mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
mutate(Grupo = case_when(
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Grupo1",
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Grupo2",
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Grupo3"
))
mean_intensidade$Year <- format(as.Date(mean_intensidade$Year), "%Y")
# Criação do gráfico de linhas
ggplot(mean_intensidade, aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group =
NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE2", color
= "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE2-linha.png", width=15, height=8)
```

```
# Gráfico para Grupo 1
```

```
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo1"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE2 -
Alternativa de Abastecimento 1", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE2-linha-Cond1.png", width=15, height=8)
```

```
# Gráfico para Grupo 2
```

```
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo2"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
```

```

geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE2 -
Alternativa de Abastecimento 2", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE2-linha-Cond2.png", width=15, height=8)

```

Gráfico para Grupo 3

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo3"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - ASE2 -
Alternativa de Abastecimento 3", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-ASE2-linha-Cond3.png", width=15, height=8)

```

#####Intensidade de não atendimento a demanda Guará#####

Função para ler e processar os arquivos

```

processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_Gua" else "_D_Gua"
  nome3 <- ".csv"

  for (i in ids) {
    arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
    Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
    colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

    if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
    }
  }
}

```

```

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorG <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorG <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorG %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorG %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

# Cálculo da Intensidade
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%

```

```

mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
arrange(Ordenacao) %>%
mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_AS1.csv", row.names = FALSE)

# Criação do gráfico
ggplot(analise_Intensidade, aes(x = NomeCenario, y = Mean_Intensidade, size =
SD_Intensidade)) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario1", xmax = "Cenario36", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightcoral", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario37", xmax = "Cenario72", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightblue", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario73", xmax = "Cenario108", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill
= "lightgreen", alpha = 0.01) +
  geom_point(color = "blue", alpha = 0.7) +
  scale_size_continuous(range = c(1, 10)) +
  labs(x = "Cenário", y = "Média da Intensidade", title = "Intensidade de não atendimento -
AS1") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
ggsave(filename="Intensidade-AS1.png", width=15, height=8)

mean_intensidade <- aggregate(Intensidade ~ NomeCenario + Year, data = combined_df,
FUN = mean)

mean_intensidade <- mean_intensidade %>%
mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
mutate(Grupo = case_when(
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Grupo1",
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Grupo2",
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Grupo3"
))
mean_intensidade$Year <- format(as.Date(mean_intensidade$Year), "%Y")
# Criação do gráfico de linhas

```

```

ggplot(mean_intensidade, aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group =
NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS1", color =
"Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS1-linha.png", width=15, height=8)

```

Gráfico para Grupo 1

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo1"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS1 -
Alternativa de Abastecimento 1", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS1-linha-Cond1.png", width=15, height=8)

```

Gráfico para Grupo 2

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo2"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS1 -
Alternativa de Abastecimento 2", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS1-linha-Cond2.png", width=15, height=8)

```

Gráfico para Grupo 3

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo3"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +

```

```

labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS1 -
Alternativa de Abastecimento 3", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS1-linha-Cond3.png", width=15, height=8)

```

```
#####Intensidade de não atendimento a demanda Candangolândia e Núcleo Bandeirante#####
```

```
# Função para ler e processar os arquivos
```

```

processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_CanNb" else "_D_CanNb"
  nome3 <- ".csv"

  for (i in ids) {
    arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
    Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
    colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

    if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
    }

    Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
    df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
    lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
  }

  df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
  df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
  df_total
}

numeradorC <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)

```

```

denominadorC <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorC %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorC %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_AS2.csv", row.names = FALSE)

# Criação do gráfico
ggplot(analise_Intensidade, aes(x = NomeCenario, y = Mean_Intensidade, size =
SD_Intensidade)) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario1", xmax = "Cenario36", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightcoral", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario37", xmax = "Cenario72", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightblue", alpha = 0.01) +

```

```

geom_rect(aes(xmin = "Cenario73", xmax = "Cenario108", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill
= "lightgreen", alpha = 0.01) +
geom_point(color = "blue", alpha = 0.7) +
scale_size_continuous(range = c(1, 10)) +
labs(x = "Cenário", y = "Média da Intensidade", title = "Intensidade de não atendimento -
AS2") +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
ggsave(filename="Intensidade-AS2.png", width=15, height=8)

```

```

mean_intensidade <- aggregate(Intensidade ~ NomeCenario + Year, data = combined_df,
FUN = mean)

```

```

mean_intensidade <- mean_intensidade %>%
mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
mutate(Grupo = case_when(
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Grupo1",
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Grupo2",
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Grupo3"
))
mean_intensidade$Year <- format(as.Date(mean_intensidade$Year), "%Y")
# Criação do gráfico de linhas
ggplot(mean_intensidade, aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group =
NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS2", color =
"Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS2-linha.png", width=15, height=8)

```

```

# Gráfico para Grupo 1

```

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo1"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
geom_line() +

```

```

labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS2 -
Alternativa de Abastecimento 1", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS2-linha-Cond1.png", width=15, height=8)

```

```

# Gráfico para Grupo 2

```

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo2"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS2 -
Alternativa de Abastecimento 2", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS2-linha-Cond2.png", width=15, height=8)

```

```

# Gráfico para Grupo 3

```

```

ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo3"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS2 -
Alternativa de Abastecimento 3", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS2-linha-Cond3.png", width=15, height=8)

```

```

#####Intensidade de não atendimento a demanda RecGamPkwSmRf2#####

```

```

# Função para ler e processar os arquivos

```

```

processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_RecGamPkwSmRf2" else "_D_RecGamPkwSmRf2"
  nome3 <- ".csv"

```

```

for (i in ids) {
  arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

  if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  }

  Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
  df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
  lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorR <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorR <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorR %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorR %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

# Cálculo da Intensidade

```

```

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_AS3.csv", row.names = FALSE)

# Criação do gráfico
ggplot(analise_Intensidade, aes(x = NomeCenario, y = Mean_Intensidade, size =
SD_Intensidade)) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario1", xmax = "Cenario36", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightcoral", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario37", xmax = "Cenario72", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightblue", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario73", xmax = "Cenario108", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill
= "lightgreen", alpha = 0.01) +
  geom_point(color = "blue", alpha = 0.7) +
  scale_size_continuous(range = c(1, 10)) +
  labs(x = "Cenário", y = "Média da Intensidade", title = "Intensidade de não atendimento -
AS3") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
ggsave(filename="Intensidade-AS3.png", width=15, height=8)

mean_intensidade <- aggregate(Intensidade ~ NomeCenario + Year, data = combined_df,
FUN = mean)

mean_intensidade <- mean_intensidade %>%

```

```

mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
mutate(Grupo = case_when(
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Grupo1",
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Grupo2",
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Grupo3"
))
mean_intensidade$Year <- format(as.Date(mean_intensidade$Year), "%Y")
# Criação do gráfico de linhas
ggplot(mean_intensidade, aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group =
NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS3", color =
"Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS3-linha.png", width=15, height=8)

# Gráfico para Grupo 1
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo1"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS3 -
Alternativa de Abastecimento 1", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS3-linha-Cond1.png", width=15, height=8)

# Gráfico para Grupo 2
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo2"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS3 -
Alternativa de Abastecimento 2", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +

```

```

theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS3-linha-Cond2.png", width=15, height=8)

# Gráfico para Grupo 3
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo3"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
  geom_line() +
  labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - AS3 -
Alternativa de Abastecimento 3", color = "Cenário") +
  scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-AS3-linha-Cond3.png", width=15, height=8)

#####Gráfico total de Intensidade#####

numeradorTOTAL <- left_join(numeradorD, numeradorSO, by = c("NomeCenario",
"Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorTO, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorG, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorC, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorR, by = c("NomeCenario", "Series", "Year"))
numeradorTOTAL <- numeradorTOTAL %>%
  mutate(TotalValue = coalesce(Value.x,0) + coalesce(Value.y,0) + coalesce(Value.x.x,0) +
coalesce(Value.y.y,0) + coalesce(Value.x.x.x,0) + coalesce(Value.y.y.y,0))

denominadorTOTAL <- left_join(denominadorD, denominadorSO, by = c("NomeCenario",
"Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorTO, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorG, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorC, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorR, by = c("NomeCenario", "Series", "Year"))

denominadorTOTAL <- denominadorTOTAL %>%

```

```
mutate(TotalValue = coalesce(Value.x,0) + coalesce(Value.y,0) + coalesce(Value.x.x,0) +
coalesce(Value.y.y,0) + coalesce(Value.x.x.x,0) + coalesce(Value.y.y.y,0))
```

```
numerador_agregado <- numeradorTOTAL %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(TotalValue), .groups = "drop")
```

```
denominador_agregado <- denominadorTOTAL %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(TotalValue), .groups = "drop")
```

```
combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))
```

```
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))
```

Salvando o resultado

```
combined_df_select <- combined_df[,c("NomeCenario", "Series", "Year", "Intensidade")]
combined_df_select$NomeCenario <- gsub("Cenario", "",
combined_df_select$NomeCenario)
combined_df_select$Series <- gsub("Serie", "", combined_df_select$Series)
combined_df_select$id <- paste(combined_df_select$NomeCenario,
combined_df_select$Series, sep="-")
```

```
write.csv(combined_df_select, "analiseFalhasCenarios.csv", row.names = FALSE)
```

```
analise_Intensidade <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))
```

```
analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
```

```

arrange(Ordenacao) %>%
mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))

# Criação do gráfico
ggplot(analise_Intensidade, aes(x = NomeCenario, y = Mean_Intensidade, size =
SD_Intensidade)) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario1", xmax = "Cenario36", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightcoral", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario37", xmax = "Cenario72", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill =
"lightblue", alpha = 0.01) +
  geom_rect(aes(xmin = "Cenario73", xmax = "Cenario108", ymin = -Inf, ymax = Inf), fill
= "lightgreen", alpha = 0.01) +
  geom_point(color = "blue", alpha = 0.7) +
  scale_size_continuous(range = c(1, 10)) +
  labs(x = "Cenário", y = "Média da Intensidade", title = "Intensidade de não atendimento
total") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))
ggsave(filename="Intensidade-TOTAL.png", width=15, height=8)

mean_intensidade <- aggregate(Intensidade ~ NomeCenario + Year, data = combined_df,
FUN = mean)

mean_intensidade <- mean_intensidade %>%
mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
mutate(Grupo = case_when(
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Grupo1",
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Grupo2",
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Grupo3"
))
mean_intensidade$Year <- format(as.Date(mean_intensidade$Year), "%Y")

# Criação do gráfico de linhas
ggplot(mean_intensidade, aes(x = Year, y = Intensidade, color = Ordenacao, group =
NomeCenario)) +
  geom_line() +

```

```
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade", color =
"Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-TOTAL-linha.png", width=15, height=8)
```

```
# Gráfico para Grupo 1
```

```
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo1"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - Alternativa de
Abastecimento 1", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-TOTAL-linha-Cond1.png", width=15, height=8)
```

```
# Gráfico para Grupo 2
```

```
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo2"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - Alternativa de
Abastecimento 2", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
ggsave(filename="Intensidade-TOTAL-linha-Cond2.png", width=15, height=8)
```

```
# Gráfico para Grupo 3
```

```
ggplot(filter(mean_intensidade, Grupo == "Grupo3"), aes(x = Year, y = Intensidade, color
= Ordenacao, group = NomeCenario)) +
geom_line() +
labs(x = "Ano", y = "Média da Intensidade", title = "Média da Intensidade - Alternativa de
Abastecimento 3", color = "Cenário") +
scale_color_gradientn(colors = c("blue", "yellow")) +
theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust = 1))
```

```
ggsave(filename="Intensidade-TOTAL-linha-Cond3.png", width=15, height=8)
```

```
library(anytime)
```

```
library(tibble)
```

```
library(tidyr)
```

```
library(dplyr)
```

```
library(ggplot2)
```

```
setwd("F:/OneDrive - unb.br/Mestrado/Dissertação/Resultados")
```

```
# Defina o valor fixo para consumoEta
```

```
consumoEtaRDE <- 0.97
```

```
consumoEtaBSB <- 0.67
```

```
consumoEtaLNT <- 0.68
```

```
consumoEtaCOR <- 1.15
```

```
lista_dataframes <- list()
```

```
nome1 <- "Cenario"
```

```
nome2 <- "_TL_to ETA_RDE_from R_Descoberto"
```

```
nome3 <- ".csv"
```

```
for (i in 1:108) {
```

```
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)
```

```
  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
```

```
  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))
```

```
  if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
```

```
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
```

```
  }
```

```

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")

df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -NomeSerie)

nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long
}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df$Year <- as.Date(combined_df$Year, "%Y-%m-%d")

ano_base <- min(combined_df$Year)

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Value = Value * consumoEtaRDE)

SomaProducaoRDE <- combined_df %>%
  group_by(NomeSerie, NomeCenario) %>%
  summarize(kWh_parcial = sum(Value))

lista_dataframes <- list()

nome1 <- "Cenario"
nome2 <- "_TL_to ETA_BSB_from Cap ETA BSB"
nome3 <- ".csv"

for (i in 1:108) {
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)

  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)

  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))
}

```

```

if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
  colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
}

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")

df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -NomeSerie)

nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long
}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df$Year <- as.Date(combined_df$Year, "%Y-%m-%d")

ano_base <- min(combined_df$Year)

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Value = Value * consumoEtaBSB)

SomaProducaoBSB <- combined_df %>%
  group_by(NomeSerie, NomeCenario) %>%
  summarize(kWh_parcial = sum(Value))

lista_dataframes <- list()

nome1 <- "Cenario"
nome2 <- "_TL_to ETA_LNT_from R_Paranoa"
nome3 <- ".csv"

for (i in 1:108) {
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)

```

```

Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)

colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
  colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
}

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")

df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -NomeSerie)

nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long
}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df$Year <- as.Date(combined_df$Year, "%Y-%m-%d")

ano_base <- min(combined_df$Year)

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Value = Value * consumoEtaLNT)

SomaProducaoLNT <- combined_df %>%
  group_by(NomeSerie, NomeCenario) %>%
  summarize(kWh_parcial = sum(Value))

lista_dataframes <- list()

nome1 <- "Cenario"
nome2 <- "_TL_to ETA_COR_from R_Corumba"

```

```

nome3 <- ".csv"

for (i in 1:108) {
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)

  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)

  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

  if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  }

  Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")

  df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -NomeSerie)

  nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
  lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long
}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df$Year <- as.Date(combined_df$Year, "%Y-%m-%d")

ano_base <- min(combined_df$Year)

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Value = Value * consumoEtaCOR)

SomaProducaoCOR <- combined_df %>%
  group_by(NomeSerie, NomeCenario) %>%
  summarize(kWh_parcial = sum(Value))

```

```
lista_SomaProducao <- list(SomaProducaoRDE, SomaProducaoBSB, SomaProducaoLNT,
SomaProducaoCOR)
```

```
SomaProducao_final <- bind_rows(lista_SomaProducao)
```

```
consumoProducaoTotal <- SomaProducao_final %>%
  group_by(NomeSerie, NomeCenario) %>%
  summarize(Consumo_kWh_Total = sum(kWh_parcial))
```

```
analise_consumoProducaoTotal <- consumoProducaoTotal %>%
  group_by(NomeCenario) %>%
  summarize(Mean_consumoProducaoTotal = mean(Consumo_kWh_Total, na.rm =
TRUE),
            SD_consumoProducaoTotal = sd(Consumo_kWh_Total, na.rm = TRUE))
```

```
analise_consumoProducaoTotal <- analise_consumoProducaoTotal %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = NomeCenario))
```

```
consumoProducaoTotal_select <-
consumoProducaoTotal[,c("NomeCenario", "NomeSerie", "Consumo_kWh_Total")]
consumoProducaoTotal_select$NomeCenario <- gsub("Cenario", "",
consumoProducaoTotal_select$NomeCenario)
consumoProducaoTotal_select$NomeSerie <- gsub("Serie", "",
consumoProducaoTotal_select$NomeSerie)
consumoProducaoTotal_select$id <- paste(consumoProducaoTotal_select$NomeCenario,
"-", consumoProducaoTotal_select$NomeSerie, sep="")
```

```
write.csv(consumoProducaoTotal_select, "consumoProducaoTotal.csv", row.names =
FALSE)
```

```

library(anytime)
library(tibble)
library(tidyr)
library(dplyr)
library(ggplot2)

setwd("F:/OneDrive - unb.br/Mestrado/Dissertação/Resultados")

lista_dataframes <- list()

nome1 <- "Cenario"
nome2 <- "_RSV_R_Corumba"
nome3 <- ".csv"

start_time <- Sys.time()

for (i in 1:108) {
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)

  if (!file.exists(arquivo)) {
    message("Arquivo não encontrado: ", arquivo)
    next
  }

  message("Processando arquivo: ", arquivo)
  Cenario <- tryCatch(read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names =
FALSE),
    error = function(e) {
      message("Erro ao ler o arquivo: ", arquivo)
      return(NULL)
    })
  if (is.null(Cenario)) next
}

```

```

col_dates <- tryCatch({
  sapply(colnames(Cenario), function(x) paste0("01-", x))
}, error = function(e) {
  message("Erro ao converter nomes das colunas em datas: ", arquivo)
  colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  return(NULL)
})

if (!is.null(col_dates)) {
  col_dates <- anytime::anydate(col_dates)
  if (any(is.na(col_dates))) {
    message("Problema com os nomes das colunas no arquivo: ", arquivo)
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  } else {
    colnames(Cenario) <- col_dates
  }
}

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")
df_long <- gather(Cenario, key = "MesAno", value = "Value", -NomeSerie)
df_long$MesAno <- anytime::anydate(df_long$MesAno)

nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long

message("Concluído: ", nome_do_dataframe)
}

end_time <- Sys.time()
message("Tempo total de processamento: ", end_time - start_time)

if (length(lista_dataframes) == 0) {
  stop("Nenhum dataframe foi carregado. Verifique se os arquivos existem e estão no
formato correto.")
}

```

```

}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Flag = ifelse(Value < 2950227601, 1, 0))

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Ano = format(MesAno, "%Y"))

result_df <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario, NomeSerie, Ano) %>%
  summarise(TotalFlag = sum(Flag, na.rm = TRUE)) %>%
  ungroup()

combined_df_select <- result_df[,c("NomeCenario", "NomeSerie", "Ano", "TotalFlag")]
combined_df_select$NomeCenario <- gsub("Cenario", "",
combined_df_select$NomeCenario)
combined_df_select$NomeSerie <- gsub("Serie", "", combined_df_select$NomeSerie)
combined_df_select$id <- paste(combined_df_select$NomeCenario,
combined_df_select$NomeSerie, sep="-")
combined_df_selectC <- combined_df_select

lista_dataframes <- list()

nome1 <- "Cenario"
nome2 <- "_RSV_R_Descoberto"
nome3 <- ".csv"

start_time <- Sys.time()

for (i in 1:108) {
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)

```

```

if (!file.exists(arquivo)) {
  message("Arquivo não encontrado: ", arquivo)
  next
}

message("Processando arquivo: ", arquivo)
Cenario <- tryCatch(read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names =
FALSE),
  error = function(e) {
    message("Erro ao ler o arquivo: ", arquivo)
    return(NULL)
  })
if (is.null(Cenario)) next

col_dates <- tryCatch({
  sapply(colnames(Cenario), function(x) paste0("01-", x))
}, error = function(e) {
  message("Erro ao converter nomes das colunas em datas: ", arquivo)
  colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  return(NULL)
})

if (!is.null(col_dates)) {
  col_dates <- anytime::anydate(col_dates)
  if (any(is.na(col_dates))) {
    message("Problema com os nomes das colunas no arquivo: ", arquivo)
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  } else {
    colnames(Cenario) <- col_dates
  }
}

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")
df_long <- gather(Cenario, key = "MesAno", value = "Value", -NomeSerie)

```

```

df_long$MesAno <- anytime::anydate(df_long$MesAno)

nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long

message("Concluído: ", nome_do_dataframe)
}

end_time <- Sys.time()
message("Tempo total de processamento: ", end_time - start_time)

if (length(lista_dataframes) == 0) {
  stop("Nenhum dataframe foi carregado. Verifique se os arquivos existem e estão no
formato correto.")
}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Flag = ifelse(Value < 58491390, 1, 0))

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Ano = format(MesAno, "%Y"))

result_df <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario, NomeSerie, Ano) %>%
  summarise(TotalFlag = sum(Flag, na.rm = TRUE)) %>%
  ungroup()

combined_df_select <- result_df[,c("NomeCenario", "NomeSerie", "Ano", "TotalFlag")]
combined_df_select$NomeCenario <- gsub("Cenario", "",
combined_df_select$NomeCenario)
combined_df_select$NomeSerie <- gsub("Serie", "", combined_df_select$NomeSerie)

```

```

combined_df_select$id          <-          paste(combined_df_select$NomeCenario,
combined_df_select$NomeSerie, sep="-")
combined_df_selectD <- combined_df_select

lista_dataframes <- list()

nome1 <- "Cenario"
nome2 <- "_RSV_R_Santa Maria"
nome3 <- ".csv"

start_time <- Sys.time()

for (i in 1:108) {
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)

  if (!file.exists(arquivo)) {
    message("Arquivo não encontrado: ", arquivo)
    next
  }

  message("Processando arquivo: ", arquivo)
  Cenario <- tryCatch(read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names =
FALSE),
                    error = function(e) {
                      message("Erro ao ler o arquivo: ", arquivo)
                      return(NULL)
                    })
  if (is.null(Cenario)) next

  col_dates <- tryCatch({
    sapply(colnames(Cenario), function(x) paste0("01-", x))
  }, error = function(e) {
    message("Erro ao converter nomes das colunas em datas: ", arquivo)
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  })
}

```

```

    return(NULL)
  })

  if (!is.null(col_dates)) {
    col_dates <- anytime::anydate(col_dates)
    if (any(is.na(col_dates))) {
      message("Problema com os nomes das colunas no arquivo: ", arquivo)
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
    } else {
      colnames(Cenario) <- col_dates
    }
  }

  Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")
  df_long <- gather(Cenario, key = "MesAno", value = "Value", -NomeSerie)
  df_long$MesAno <- anytime::anydate(df_long$MesAno)

  nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
  lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long

  message("Concluído: ", nome_do_dataframe)
}

end_time <- Sys.time()
message("Tempo total de processamento: ", end_time - start_time)

if (length(lista_dataframes) == 0) {
  stop("Nenhum dataframe foi carregado. Verifique se os arquivos existem e estão no
formato correto.")
}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df <- combined_df %>%

```

```

mutate(Flag = ifelse(Value < 48198060, 1, 0))

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Ano = format(MesAno, "% Y"))

result_df <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario, NomeSerie, Ano) %>%
  summarise(TotalFlag = sum(Flag, na.rm = TRUE)) %>%
  ungroup()

combined_df_select <- result_df[,c("NomeCenario", "NomeSerie", "Ano", "TotalFlag")]
combined_df_select$NomeCenario <- gsub("Cenario", "",
combined_df_select$NomeCenario)
combined_df_select$NomeSerie <- gsub("Serie", "", combined_df_select$NomeSerie)
combined_df_select$id <- paste(combined_df_select$NomeCenario,
combined_df_select$NomeSerie, sep="-")
combined_df_selectSM <- combined_df_select

lista_dataframes <- list()

nome1 <- "Cenario"
nome2 <- "_RSV_R_Paranoa"
nome3 <- ".csv"

start_time <- Sys.time()

for (i in 1:108) {
  arquivo <- paste0(nome1, i, nome2, nome3)

  if (!file.exists(arquivo)) {
    message("Arquivo não encontrado: ", arquivo)
    next
  }
}

```

```

message("Processando arquivo: ", arquivo)
Cenario <- tryCatch(read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names =
FALSE),
  error = function(e) {
    message("Erro ao ler o arquivo: ", arquivo)
    return(NULL)
  })
if (is.null(Cenario)) next

col_dates <- tryCatch({
  sapply(colnames(Cenario), function(x) paste0("01-", x))
}, error = function(e) {
  message("Erro ao converter nomes das colunas em datas: ", arquivo)
  colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  return(NULL)
})

if (!is.null(col_dates)) {
  col_dates <- anytime::anydate(col_dates)
  if (any(is.na(col_dates))) {
    message("Problema com os nomes das colunas no arquivo: ", arquivo)
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  } else {
    colnames(Cenario) <- col_dates
  }
}

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "NomeSerie")
df_long <- gather(Cenario, key = "MesAno", value = "Value", -NomeSerie)
df_long$MesAno <- anytime::anydate(df_long$MesAno)

nome_do_dataframe <- paste0("Cenario", i)
lista_dataframes[[nome_do_dataframe]] <- df_long

```

```

message("Concluído: ", nome_do_dataframe)
}

end_time <- Sys.time()
message("Tempo total de processamento: ", end_time - start_time)

if (length(lista_dataframes) == 0) {
  stop("Nenhum dataframe foi carregado. Verifique se os arquivos existem e estão no
formato correto.")
}

combined_df <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Flag = ifelse(Value < 427478363, 1, 0))

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Ano = format(MesAno, "%Y"))

result_df <- combined_df %>%
  group_by(NomeCenario, NomeSerie, Ano) %>%
  summarise(TotalFlag = sum(Flag, na.rm = TRUE)) %>%
  ungroup()

combined_df_select <- result_df[,c("NomeCenario", "NomeSerie", "Ano", "TotalFlag")]
combined_df_select$NomeCenario <- gsub("Cenario", "",
combined_df_select$NomeCenario)
combined_df_select$NomeSerie <- gsub("Serie", "", combined_df_select$NomeSerie)
combined_df_select$id <- paste(combined_df_select$NomeCenario,
combined_df_select$NomeSerie, sep="-")

combined_df_selectP <- combined_df_select

combined_df_selectC1 <- combined_df_selectC[,c("id", "Ano", "TotalFlag")]

```

```

combined_df_selectD1 <- combined_df_selectD[,c("id","Ano","TotalFlag")]
combined_df_selectSM1 <- combined_df_selectSM[,c("id","Ano","TotalFlag")]
combined_df_selectP1 <- combined_df_selectP[,c("id","Ano","TotalFlag")]

combined_todos_reservatorios <- left_join(combined_df_selectC1, combined_df_selectD1,
by = c("id","Ano")) %>%
  left_join(combined_df_selectSM1, by = c("id","Ano")) %>%
  left_join(combined_df_selectP1, by = c("id","Ano"))
combined_todos_reservatorios <- combined_todos_reservatorios %>%
  mutate(Total = coalesce(TotalFlag.x,0) + coalesce(TotalFlag.y,0) +
coalesce(TotalFlag.x.x,0) + coalesce(TotalFlag.y.y,0))

write.csv(combined_todos_reservatorios, "analiseFalhaReservatorios.csv", row.names =
FALSE)

```

```

library(anytime)
library(tibble)
library(tidyr)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(lubridate)
library(writexl)

setwd("F:/OneDrive - unb.br/Mestrado/Dissertação/Resultados")

#####Intensidade de não atendimento a demanda Sistema Descoberto#####
lista_dataframes <- list()

# Função para ler e processar os arquivos
processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_SistD" else "_D_SistD"
  nome3 <- ".csv"

```

```

for (i in ids) {
  arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

  if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  }

  Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
  df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
  lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorD <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorD <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorD %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorD %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

```

```

# Cálculo da Intensidade
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = unique(NomeCenario))) %>%
  mutate(Condicao = case_when(
    Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Condicao1",
    Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Condicao2",
    Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Condicao3"))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  group_by(Condicao) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
           SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_ASE1.csv", row.names = FALSE)

#####Intensidade de não atendimento a demanda Sistema Sobradinho Planaltina#####

# Função para ler e processar os arquivos
processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_SistSoPI" else "_D_SistSoPI"
  nome3 <- ".csv"

```

```

for (i in ids) {
  arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

  if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
    colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
  }

  Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
  df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
  lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorSO <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorSO <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorSO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorSO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

combined_df <- combined_df %>%

```

```
mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))
```

```
analise_Intensidade <- combined_df %>%
```

```
mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
```

```
arrange(Ordenacao) %>%
```

```
mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = unique(NomeCenario))) %>%
```

```
mutate(Condicao = case_when(
```

```
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Condicao1",
```

```
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Condicao2",
```

```
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Condicao3"))
```

```
analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
```

```
group_by(Condicao) %>%
```

```
summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
```

```
          SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))
```

```
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_ASE3.csv", row.names = FALSE)
```

```
#####Intensidade de não atendimento a demanda Sistema Torto Santa Maria Paranoá#####
```

```
# Função para ler e processar os arquivos
```

```
processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
```

```
  lista_dataframes <- list()
```

```
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_SistToSmPa" else "_D_SistToSmPa"
```

```
  nome3 <- ".csv"
```

```
for (i in ids) {
```

```
  arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
```

```
  Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
```

```
  colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))
```

```
  if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
```

```

  colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
}

Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorTO <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorTO <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorTO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorTO %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

# Cálculo da Intensidade
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%

```

```

arrange(Ordenacao) %>%
mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = unique(NomeCenario))) %>%
mutate(Condicao = case_when(
  Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Condicao1",
  Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Condicao2",
  Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Condicao3"))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
group_by(Condicao) %>%
summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
          SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_ASE2.csv", row.names = FALSE)

```

```
#####Intensidade de não atendimento a demanda Guará#####
```

```
# Função para ler e processar os arquivos
```

```

processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_Gua" else "_D_Gua"
  nome3 <- ".csv"

  for (i in ids) {
    arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
    Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
    colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

    if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
    }

    Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
    df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
  }
}

```

```

  lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
}

df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
df_total
}

numeradorG <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorG <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorG %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorG %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

# Cálculo da Intensidade
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = unique(NomeCenario))) %>%
  mutate(Condicao = case_when(
    Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Condicao1",
    Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Condicao2",

```

```

Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Condicao3"))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  group_by(Condicao) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_AS1.csv", row.names = FALSE)

#####Intensidade de não atendimento a demanda Candangolândia e Núcleo Bandeirante#####

# Função para ler e processar os arquivos
processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
  lista_dataframes <- list()
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_CanNb" else "_D_CanNb"
  nome3 <- ".csv"

  for (i in ids) {
    arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
    Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
    colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))

    if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
    }

    Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
    df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
    lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
  }

  df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
  df_total$Year <- as.character(df_total$Year)

```

```

df_total
}

numeradorC <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
denominadorC <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)

numerador_agregado <- numeradorC %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorC %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = unique(NomeCenario))) %>%
  mutate(Condicao = case_when(
    Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Condicao1",
    Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Condicao2",
    Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Condicao3"))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  group_by(Condicao) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
    SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))

```

```
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_AS2.csv", row.names = FALSE)
```

```
#####Intensidade de não atendimento a demanda RecGamPkwSmRf2#####
```

```
# Função para ler e processar os arquivos
```

```
processa_arquivo <- function(base_nome, tipo, ids) {
```

```
  lista_dataframes <- list()
```

```
  nome2 <- if (tipo == "falha") "_UD_RecGamPkwSmRf2" else "_D_RecGamPkwSmRf2"
```

```
  nome3 <- ".csv"
```

```
  for (i in ids) {
```

```
    arquivo <- paste0(base_nome, i, nome2, nome3)
```

```
    Cenario <- read.csv(arquivo, skip = 3, sep = ";", row.names = 1, check.names = FALSE)
```

```
    colnames(Cenario) <- anytime::anydate(colnames(Cenario))
```

```
    if (any(is.na(colnames(Cenario))) || any(nchar(colnames(Cenario)) == 0)) {
```

```
      colnames(Cenario) <- paste0("V", seq_along(colnames(Cenario)))
```

```
    }
```

```
    Cenario <- tibble::rownames_to_column(Cenario, var = "Series")
```

```
    df_long <- gather(Cenario, key = "Year", value = "Value", -Series)
```

```
    lista_dataframes[[paste0(base_nome, i)]] <- df_long
```

```
  }
```

```
df_total <- bind_rows(lista_dataframes, .id = "NomeCenario")
```

```
df_total$Year <- as.character(df_total$Year)
```

```
df_total
```

```
}
```

```
numeradorR <- processa_arquivo("Cenario", "falha", 1:108)
```

```
denominadorR <- processa_arquivo("Cenario", "agua", 1:108)
```

```

numerador_agregado <- numeradorR %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(Value), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorR %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(Value), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

# Cálculo da Intensidade
combined_df <- combined_df %>%
  mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

analise_Intensidade <- combined_df %>%
  mutate(Ordenacao = as.numeric(gsub("Cenario", "", NomeCenario))) %>%
  arrange(Ordenacao) %>%
  mutate(NomeCenario = factor(NomeCenario, levels = unique(NomeCenario))) %>%
  mutate(Condicao = case_when(
    Ordenacao >= 1 & Ordenacao <= 36 ~ "Condicao1",
    Ordenacao >= 37 & Ordenacao <= 72 ~ "Condicao2",
    Ordenacao >= 73 & Ordenacao <= 108 ~ "Condicao3"))

analise_Intensidade <- analise_Intensidade %>%
  group_by(Condicao) %>%
  summarize(Mean_Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            SD_Intensidade = sd(Intensidade, na.rm = TRUE))
write.csv(analise_Intensidade, "analise_intensidade_AS3.csv", row.names = FALSE)

#####Gráfico total de Intensidade#####

```

```

numeradorTOTAL <- left_join(numeradorD, numeradorSO, by = c("NomeCenario",
"Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorTO, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorG, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorC, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(numeradorR, by = c("NomeCenario", "Series", "Year"))
numeradorTOTAL <- numeradorTOTAL %>%
  mutate(TotalValue = coalesce(Value.x,0) + coalesce(Value.y,0) + coalesce(Value.x.x,0) +
coalesce(Value.y.y,0) + coalesce(Value.x.x.x,0) + coalesce(Value.y.y.y,0))

denominadorTOTAL <- left_join(denominadorD, denominadorSO, by = c("NomeCenario",
"Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorTO, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorG, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorC, by = c("NomeCenario", "Series", "Year")) %>%
  left_join(denominadorR, by = c("NomeCenario", "Series", "Year"))

denominadorTOTAL <- denominadorTOTAL %>%
  mutate(TotalValue = coalesce(Value.x,0) + coalesce(Value.y,0) + coalesce(Value.x.x,0) +
coalesce(Value.y.y,0) + coalesce(Value.x.x.x,0) + coalesce(Value.y.y.y,0))

numerador_agregado <- numeradorTOTAL %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_num = sum(TotalValue), .groups = "drop")

denominador_agregado <- denominadorTOTAL %>%
  group_by(NomeCenario, Series, Year) %>%
  summarise(Value_den = sum(TotalValue), .groups = "drop")

combined_df <- left_join(numerador_agregado, denominador_agregado, by =
c("NomeCenario", "Series", "Year"))

combined_df <- combined_df %>%

```

```

mutate(Intensidade = ifelse(Value_den > 0, Value_num / Value_den, NA))

# Salvando o resultado
combined_df_select <- combined_df[,c("NomeCenario", "Series", "Year", "Intensidade")]
combined_df_select$NomeCenario <- gsub("Cenario", "",
combined_df_select$NomeCenario)
combined_df_select$Series <- gsub("Serie", "", combined_df_select$Series)
combined_df_select$id <- paste(combined_df_select$NomeCenario,
combined_df_select$Series, sep="-")

write.csv(combined_df_select, "analiseFalhasCenarios.csv", row.names = FALSE)

```

```

library(readxl)
library(dplyr)
library(tidyr)
library(ggplot2)
library(MASS)

setwd("F:/OneDrive - unb.br/Mestrado/Dissertação/Resultados")

# Carregar os dados
dados1 <- read.csv("analiseFalhasCenarios.csv")
dados2 <- read.csv("consumoProducaoTotal.csv")
dados3 <- read_excel("reducaoPerdasCenarios.xlsx")
dados4 <- read.csv("analiseFalhaReservatorios.csv")

dados1 <- dados1 %>%
  group_by(id) %>%
  summarize(Intensidade = mean(Intensidade, na.rm = TRUE),
            HabAtingidos = mean(HabAtingidos, na.rm = TRUE))
dados1 <- dados1[, c("id", "Intensidade")]

```

```

dados2 <- dados2[, c("id", "Consumo_kWh_Total")]
dados3 <- dados3[, c("id", "ReducaoPerdas", "Cenario", "CrescimentoDemanda")]
dados4 <- dados4 %>%
  group_by(id) %>%
  summarize(Total = sum(Total, na.rm = TRUE))
dados4 <- dados4[, c("id", "Total")]

dados_combinados <- dados1 %>%
  left_join(dados2, by = "id") %>%
  left_join(dados3, by = "id") %>%
  left_join(dados4, by = "id")

dados_combinados <- dados_combinados %>%
  mutate(GrupoCor = case_when(
    Cenario >= 1 & Cenario <= 36 ~ "Condicao1",
    Cenario >= 37 & Cenario <= 72 ~ "Condicao2",
    Cenario >= 73 & Cenario <= 108 ~ "Condicao3"
  ))

dados_combinados <- ungroup(dados_combinados)

max_consumo <- max(dados_combinados$Consumo_kWh_Total)
max_intensidade <- max(dados_combinados$Intensidade)
max_total <- max(dados_combinados$Total)
min_total <- min(dados_combinados$Total)
min_consumo <- min(dados_combinados$Consumo_kWh_Total)
min_intensidade <- min(dados_combinados$Intensidade)

novas_linhas <- data.frame(
  id = rep(NA, 2),
  Consumo_kWh_Total = c(max_consumo, min_consumo),
  Intensidade = c(max_intensidade, min_intensidade),
  Total = c(max_total, min_total),
  ReducaoPerdas = c(0.1, 0),

```

```
CrescimentoDemanda = c(0.02, 0.01),
```

```
Cenario = rep(NA, 2),
```

```
GrupoCor = rep(NA, 2))
```

```
#####Novos Gráficos#####
```

```
dados_grupo_selecionado01 <- dados_combinados %>%
```

```
  filter(GrupoCor=="Condicao1")
```

```
dados_grupo_selecionado01 <- rbind(dados_grupo_selecionado01, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado02 <- dados_combinados %>%
```

```
  filter(GrupoCor=="Condicao2")
```

```
dados_grupo_selecionado02 <- rbind(dados_grupo_selecionado02, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado03 <- dados_combinados %>%
```

```
  filter(GrupoCor=="Condicao3")
```

```
dados_grupo_selecionado03 <- rbind(dados_grupo_selecionado03, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado_criterio <- dados_combinados %>%
```

```
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
```

```
    Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
```

```
    Total < mean(dados_combinados$Total))
```

```
dados_grupo_selecionado_criterio <- rbind(dados_grupo_selecionado_criterio,  
novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado_criterio01 <- dados_combinados %>%
```

```
  filter(GrupoCor=="Condicao1",
```

```
    Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
```

```
    Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
```

```
    Total < mean(dados_combinados$Total))
```

```
dados_grupo_selecionado_criterio01 <- rbind(dados_grupo_selecionado_criterio01,  
novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado_criterio02 <- dados_combinados %>%
```

```

filter(GrupoCor=="Condicao2",
      Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
      Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
      Total < mean(dados_combinados$Total))
dados_grupo_selecionado_criterio02 <- rbind(dados_grupo_selecionado_criterio02,
novas_linhas)

dados_grupo_selecionado_criterio03 <- dados_combinados %>%
  filter(GrupoCor=="Condicao3",
        Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
        Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
        Total < mean(dados_combinados$Total))
dados_grupo_selecionado_criterio03 <- rbind(dados_grupo_selecionado_criterio03,
novas_linhas)

dados_grupo_selecionado01 <- dados_combinados %>%
  filter(GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado01 <- rbind(dados_grupo_selecionado01, novas_linhas)

parcoord(dados_combinados[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],
         col = "lightgrey", var.label = TRUE)
title("Resultados das simulações")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-resultados-todos.png", width = 1500,
height = 800)
dev.off()

parcoord(dados_combinados[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],
         col = "lightgrey", var.label = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado01[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],
         col = "red", var.label = TRUE, add = TRUE)
title("Resultados das simulações - Alternativa 1")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-resultados-alternativa1.png", width =
1500, height = 800)

```

```
dev.off()
```

```
parcoord(dados_combinados[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "lightgrey", var.label = TRUE)
```

```
parcoord(dados_grupo_selecionado02[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "blue", var.label = TRUE, add = TRUE)
```

```
title("Resultados das simulações - Alternativa 2")
```

```
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-resultados-alternativa2.png", width =  
1500, height = 800)
```

```
dev.off()
```

```
parcoord(dados_combinados[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "lightgrey", var.label = TRUE)
```

```
parcoord(dados_grupo_selecionado03[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "green", var.label = TRUE, add = TRUE)
```

```
title("Resultados das simulações - Alternativa 3")
```

```
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-resultados-alternativa3.png", width =  
1500, height = 800)
```

```
dev.off()
```

```
parcoord(dados_combinados[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "lightgrey", var.label = TRUE)
```

```
parcoord(dados_grupo_selecionado_criterio01[,  
c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "red", var.label = TRUE, add = TRUE)
```

```
parcoord(dados_grupo_selecionado_criterio03[,  
c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "green", var.label = TRUE, add = TRUE)
```

```
parcoord(dados_grupo_selecionado_criterio02[,  
c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],  
         col = "blue", var.label = TRUE, add = TRUE)
```

```
title("Resultados das simulações Seleccionadas")
```

```
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-resultados-seleccionados.png", width =  
1500, height = 800)
```

```

dev.off()

parcoord(dados_combinados[, c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],
         col = "lightgrey", var.label = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado_criterio[,
c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],
         col = "red", var.label = TRUE, add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado_criterio03[,
c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],
         col = "green", var.label = TRUE, add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado_criterio02[,
c("Intensidade", "Consumo_kWh_Total", "Total")],
         col = "blue", var.label = TRUE, add = TRUE)
title("Resultados das simulações Seleccionadas")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-resultados-selecionados.png", width =
1500, height = 800)
dev.off()

```

```

#####"CoordenadasParalelas-perdas-limites-Cond1.png"#####
dados_grupo_selecionado0 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         ReducaoPerdas == 0.00,
         GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado0 <- rbind(dados_grupo_selecionado0, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado1 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),

```

```

    ReducaoPerdas == 0.02,
    GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado1 <- rbind(dados_grupo_selecionado1, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado2 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
    Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
    Total < mean(dados_combinados$Total),
    ReducaoPerdas == 0.04,
    GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado2 <- rbind(dados_grupo_selecionado2, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado3 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
    Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
    Total < mean(dados_combinados$Total),
    ReducaoPerdas == 0.06,
    GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado3 <- rbind(dados_grupo_selecionado3, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado4 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
    Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
    Total < mean(dados_combinados$Total),
    ReducaoPerdas == 0.08,
    GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado4 <- rbind(dados_grupo_selecionado4, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado5 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
    Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
    Total < mean(dados_combinados$Total),
    ReducaoPerdas == 0.10,
    GrupoCor=="Condicao1")

```

```

dados_grupo_selecionado5 <- rbind(dados_grupo_selecionado5, novas_linhas)

parcoord(dados_combinados[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "lightgrey", var.label = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado5[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "red", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado4[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "yellow", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado3[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "blue", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado2[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "green", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado1[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "pink", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado0[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "orange", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

title("Simulações - limites dos objetivos - Alternativa 1")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-perdas-limites-Cond1.png", width =
1500, height = 800)

```

```
dev.off()
```

```
#####"CoordenadasParalelas-perdas-limites-Cond2.png"#####
```

```
dados_grupo_selecionado0 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         ReducaoPerdas == 0.00,  
         GrupoCor=="Condicao2")  
dados_grupo_selecionado0 <- rbind(dados_grupo_selecionado0, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado1 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         ReducaoPerdas == 0.02,  
         GrupoCor=="Condicao2")  
dados_grupo_selecionado1 <- rbind(dados_grupo_selecionado1, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado2 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         ReducaoPerdas == 0.04,  
         GrupoCor=="Condicao2")  
dados_grupo_selecionado2 <- rbind(dados_grupo_selecionado2, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado3 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         ReducaoPerdas == 0.06,  
         GrupoCor=="Condicao2")  
dados_grupo_selecionado3 <- rbind(dados_grupo_selecionado3, novas_linhas)
```

```

dados_grupo_selecionado4 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         ReducaoPerdas == 0.08,
         GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado4 <- rbind(dados_grupo_selecionado4, novas_linhas)

```

```

dados_grupo_selecionado5 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         ReducaoPerdas == 0.10,
         GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado5 <- rbind(dados_grupo_selecionado5, novas_linhas)

```

```

parcoord(dados_combinados[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "lightgrey", var.label = TRUE)

```

```

parcoord(dados_grupo_selecionado5[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "red", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

```

```

parcoord(dados_grupo_selecionado4[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "yellow", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

```

```

parcoord(dados_grupo_selecionado3[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "blue", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

```

```

parcoord(dados_grupo_selecionado2[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "green", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado1[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "pink", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado0[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "orange", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
title("Simulações - limites dos objetivos - Alternativa 2")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-perdas-limites-Cond2.png", width =
1500, height = 800)
dev.off()

```

```
#####"CoordenadasParalelas-perdas-limites-Cond3.png"#####
```

```

dados_grupo_selecionado0 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
  Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
  Total < mean(dados_combinados$Total),
  ReducaoPerdas == 0.00,
  GrupoCor=="Condicao3")

```

```
dados_grupo_selecionado0 <- rbind(dados_grupo_selecionado0, novas_linhas)
```

```

dados_grupo_selecionado1 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
  Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
  Total < mean(dados_combinados$Total),
  ReducaoPerdas == 0.02,
  GrupoCor=="Condicao3")

```

```
dados_grupo_selecionado1 <- rbind(dados_grupo_selecionado1, novas_linhas)
```

```

dados_grupo_selecionado2 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         ReducaoPerdas == 0.04,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado2 <- rbind(dados_grupo_selecionado2, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado3 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         ReducaoPerdas == 0.06,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado3 <- rbind(dados_grupo_selecionado3, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado4 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         ReducaoPerdas == 0.08,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado4 <- rbind(dados_grupo_selecionado4, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado5 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         ReducaoPerdas == 0.10,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado5 <- rbind(dados_grupo_selecionado5, novas_linhas)

```

```

parcoord(dados_combinados[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "lightgrey", var.label = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado5[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "red", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado4[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "yellow", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado3[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "blue", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado2[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "green", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado1[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "pink", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado0[,
c("ReducaoPerdas","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "orange", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

title("Simulações - limites dos objetivos - Alternativa 3")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-perdas-limites-Cond3.png", width =
1500, height = 800)
dev.off()

```

```
#####"CoordenadasParalelas-demanda-limites-Cond1.png"#####
```

```
dados_grupo_selecionado0 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         CrescimentoDemanda == 0.02,  
         GrupoCor=="Condicao1")  
dados_grupo_selecionado0 <- rbind(dados_grupo_selecionado0, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado1 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         CrescimentoDemanda == 0.018,  
         GrupoCor=="Condicao1")  
dados_grupo_selecionado1 <- rbind(dados_grupo_selecionado1, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado2 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         CrescimentoDemanda == 0.016,  
         GrupoCor=="Condicao1")  
dados_grupo_selecionado2 <- rbind(dados_grupo_selecionado2, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado3 <- dados_combinados %>%  
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),  
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),  
         Total < mean(dados_combinados$Total),  
         CrescimentoDemanda == 0.014,  
         GrupoCor=="Condicao1")  
dados_grupo_selecionado3 <- rbind(dados_grupo_selecionado3, novas_linhas)
```

```
dados_grupo_selecionado4 <- dados_combinados %>%
```

```

filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
      Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
      Total < mean(dados_combinados$Total),
      CrescimentoDemanda == 0.012,
      GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado4 <- rbind(dados_grupo_selecionado4, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado5 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
        Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
        Total < mean(dados_combinados$Total),
        CrescimentoDemanda == 0.01,
        GrupoCor=="Condicao1")
dados_grupo_selecionado5 <- rbind(dados_grupo_selecionado5, novas_linhas)

parcoord(dados_combinados[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "lightgrey", var.label = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado5[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "red", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado4[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "yellow", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado3[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "blue", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado2[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],

```

```

col = "green", var.label = TRUE,
add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado1[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
col = "pink", var.label = TRUE,
add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado0[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
col = "orange", var.label = TRUE,
add = TRUE)
title("Simulações - limites dos objetivos - Alternativa 1")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-demanda-limites-Cond1.png", width =
1500, height = 800)
dev.off()

```

```
#####"CoordenadasParalelas-demanda-limites-Cond2.png"#####
```

```

dados_grupo_selecionado0 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.02,
         GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado0 <- rbind(dados_grupo_selecionado0, novas_linhas)

```

```

dados_grupo_selecionado1 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.018,
         GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado1 <- rbind(dados_grupo_selecionado1, novas_linhas)

```

```

dados_grupo_selecionado2 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),

```

```

Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
Total < mean(dados_combinados$Total),
CrescimentoDemanda == 0.016,
GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado2 <- rbind(dados_grupo_selecionado2, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado3 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.014,
         GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado3 <- rbind(dados_grupo_selecionado3, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado4 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.012,
         GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado4 <- rbind(dados_grupo_selecionado4, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado5 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.01,
         GrupoCor=="Condicao2")
dados_grupo_selecionado5 <- rbind(dados_grupo_selecionado5, novas_linhas)

parcoord(dados_combinados[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "lightgrey", var.label = TRUE)

```

```

parcoord(dados_grupo_selecionado5[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "red", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado4[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "yellow", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado3[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "blue", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado2[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "green", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado1[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "pink", var.label = TRUE,
  add = TRUE)
parcoord(dados_grupo_selecionado0[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "orange", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

title("Simulações - limites dos objetivos - Alternativa 2")
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-demanda-limites-Cond2.png", width =
1500, height = 800)
dev.off()

####"CoordenadasParalelas-demanda-limites-Cond3.png"####
dados_grupo_selecionado0 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
  Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),

```

```

Total < mean(dados_combinados$Total),
CrescimentoDemanda == 0.02,
GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado0 <- rbind(dados_grupo_selecionado0, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado1 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.018,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado1 <- rbind(dados_grupo_selecionado1, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado2 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.016,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado2 <- rbind(dados_grupo_selecionado2, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado3 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.014,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado3 <- rbind(dados_grupo_selecionado3, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado4 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.012,

```

```

GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado4 <- rbind(dados_grupo_selecionado4, novas_linhas)

dados_grupo_selecionado5 <- dados_combinados %>%
  filter(Intensidade < mean(dados_combinados$Intensidade),
         Consumo_kWh_Total < mean(dados_combinados$Consumo_kWh_Total),
         Total < mean(dados_combinados$Total),
         CrescimentoDemanda == 0.01,
         GrupoCor=="Condicao3")
dados_grupo_selecionado5 <- rbind(dados_grupo_selecionado5, novas_linhas)

parcoord(dados_combinados[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "lightgrey", var.label = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado5[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "red", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado4[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "yellow", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado3[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "blue", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado2[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],
  col = "green", var.label = TRUE,
  add = TRUE)

parcoord(dados_grupo_selecionado1[,
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],

```

```
col = "pink", var.label = TRUE,  
add = TRUE)  
parcoord(dados_grupo_selecionado0[,  
c("CrescimentoDemanda","Intensidade","Consumo_kWh_Total","Total")],  
col = "orange", var.label = TRUE,  
add = TRUE)  
title("Simulações - limites dos objetivos - Alternativa 3")  
dev.copy(png, filename = "CoordenadasParalelas-demanda-limites-Cond3.png", width =  
1500, height = 800)  
dev.off()
```