
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JULIANNA SCHEFER

TÉCNICAS DE *HEDGING* PARA OPERAÇÃO DE
RESERVATÓRIOS BUSCANDO MINIMIZAR
PERDAS ECONÔMICAS

Porto Alegre

Junho 2016

JULIANNA SCHEFER

**TÉCNICAS DE *HEDGING* PARA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS
BUSCANDO MINIMIZAR PERDAS ECONÔMICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques

Porto Alegre

Junho 2016

*Dedico esta monografia à minha mãe, e
à minha avó, responsáveis por mais esta conquista,
exemplos de luta e força, de amor e dedicação,
minha admiração e amor por vocês não cabem em palavras.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Guilherme Fernandes Marques pela orientação, incentivo, oportunidades de aprendizado e pela paciência.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de realizar o curso. A todos os professores, por compartilharem o conhecimento. E aos meus colegas da graduação pela parceria que, com certeza, serão excelentes profissionais.

Agradeço à minha mãe, Elizabeth Eliana Schefer, que foi pai e mãe, pelo amor, por ser uma mãe maravilhosa, pelo carinho que nunca é demais, pelo incentivo e apoio incondicional, por ter sempre acreditado em mim, pelo exemplo de determinação e por me ensinar que sempre devemos ir em busca da felicidade.

Agradeço à minha irmã, Amanda Schefer, pelo carinho e por me mostrar que nunca é tarde para ir em busca da realização de um sonho.

Agradeço à minha avó, Adelia Schefer, pelo carinho e amor incondicional, por tudo que fez por mim, por ser essa pessoa maravilhosamente meiga e amável, por toda a atenção que dedicou a mim e por ser essencial na minha vida. E ao meu avô Alipio Armino Schefer, *in memoriam* pelo carinho e dedicação na minha criação no pouco tempo que lhe coube.

Agradeço ao meu noivo Felipe de Almeida Dal'Maso pelo companheirismo, amor e carinho; por dividir e multiplicar a vida comigo, por me mostrar que o amor supera tudo; e pelo exemplo de dedicação e competência profissional.

Agradeço à Melody Schefer pelo companheirismo em todas as horas e amor incondicional. À Begair Mendes da Rosa pelos cuidados e pela paciência. A todas as minhas amigas, em especial à Shaiene Vieira Figueira e Juliana César de Mattos, pela parceria em todos os momentos.

Agradeço aos colegas e amigos da Bourscheid Engenharia e Meio Ambiente Ltda., da Magna Engenharia Ltda. e da Engeplus Engenharia e Consultoria Ltda., em especial às minhas tutoras Elaine Lima Nunes e Josiane Fialho Gomes pelos ensinamentos e oportunidades de aprendizado.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

SCHEFER, Julianna. **Técnicas de hedging para operação de reservatórios buscando minimizar perdas econômicas**. 2016. 114 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Reservatórios representam componentes importantes da infraestrutura social e econômica e uma das principais razões para sua construção é a necessidade de garantir um abastecimento de água mais confiável a partir do armazenamento de água e regularização do fluxo natural dos cursos d'água. Porém, ultimamente tem se tornado cada vez mais difícil a construção de novos barramentos para a reservação de água, tanto por questões sociais quanto ambientais. Assim, torna-se necessário otimizar a operação dos reservatórios já existentes. Desta forma, o presente trabalho explora a aplicação de uma estratégia chamada "*hedging*" (salvaguardas) onde reduções prévias no abastecimento são efetuadas de modo a criar uma salvaguarda (aumento no volume armazenado) de modo a reduzir a probabilidade de um racionamento severo no futuro, sem que sejam aplicadas restrições desnecessárias aos usuários. Para tal, neste trabalho é desenvolvida uma rotina computacional para calcular o custo da escassez sob diferentes estratégias de operação e a verificação de outros critérios de desempenho. Os resultados demonstram que o emprego de técnicas de *hedging* apresenta redução nos custos da escassez da água, reduzindo os impactos socioeconômicos de um período de seca, e reduzindo a susceptibilidade do sistema de reservatórios a déficits de grandes magnitudes. Palavras-chave: planejamento de recursos hídricos; operação de reservatórios; políticas de operação de salvaguarda; custo da escassez da água.

ABSTRACT

Reservoirs are important components of social and economic infrastructure and one of the main reasons for its construction is the need to ensure a more reliable water supply through water storage and natural flow regulation. However, recently building new dams for water reservation have become every time more difficult due to both social and environmental concern, so it becomes necessary to optimize the operation of existing reservoirs. Thus, this paper explores the application of a strategy called "hedging" (safeguards) which prior reduction of supply are made to create a safeguard (increasing the storage) and thus reducing the probability of a severe rationing in future, without applying unnecessary restrictions to users. To this end, in this paper is developed a computational routine for calculating the scarcity cost under different operating strategies and verification of other performance criteria. The results showed that the use of *hedging* techniques present reduction in the scarcity costs, reducing the socioeconomic impact of drought and reducing the susceptibility of the reservoir system to deficits of large magnitudes.

Keywords: water resources planning; reservoir operation; *hedging* operating policies; water scarcity costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bacias de rios de domínio da União e dos Estados com trechos críticos identificados.	12
Figura 2. Sistemas de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo.	13
Figura 3. Histórico das vazões médias mensais afluentes aos reservatórios do Sistema Cantareira (Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro).	14
Figura 4. Criticidade das chuvas de janeiro a março entre 2012 e 2014 no Sudeste brasileiro.	15
Figura 5. Evolução do estoque de água no Sistema Cantareira de 2013 a 2014.	17
Figura 6. Relação benefício marginal x custo da escassez.	23
Figura 7. Regra padrão de operação – SOP (linha mais grossa).	27
Figura 8. Política de <i>hedging</i> de um ponto.	29
Figura 9. Política de <i>hedging</i> de dois pontos.	29
Figura 10. Política de <i>hedging</i> de três pontos.	30
Figura 11. Política de <i>hedging</i> contínuo.	30
Figura 12. Política de <i>hedging</i> por zonas (fases discretas).	31
Figura 13. Política de <i>hedging</i> por zonas controlada pelo armazenamento inicial.	31
Figura 14. Elasticidade-preço da demanda.	45
Figura 15. Curva de benefício marginal, considerando comportamento linear e logarítmico.	50
Figura 16. Fluxograma metodológico seguido para execução do presente trabalho.	52
Figura 17. Esquema ilustrativo do Sistema Cantareira.	53
Figura 18. Diagrama simplificado do Sistema Cantareira.	54
Figura 19. Série de vazões médias mensais do rio Jaguari no Aproveitamento Jaguari-Jacareí.	56
Figura 20. Série de vazões médias mensais do rio Cachoeira no Aproveitamento Cachoeira.	56
Figura 21. Série de vazões médias mensais do rio Atibainha no Aproveitamento Atibainha.	56
Figura 22. Série de vazões médias mensais do rio Juqueri no Aproveitamento Paiva Castro.	57
Figura 23. Série de vazões médias mensais do Sistema Equivalente (Jaguari-Jacareí + Cachoeira + Atibainha).	57
Figura 24. Série de vazões médias mensais afluentes aos quatro reservatórios do Sistema Cantareira (Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro).	57

Figura 25. Relação área x volume para o reservatório Jaguari-Jacareí.	59
Figura 26. Relação área x volume para o reservatório Cachoeira.	59
Figura 27. Relação área x volume para o reservatório Atibainha.	59
Figura 28. Relação área x volume para o reservatório Paiva Castro.	60
Figura 29. Fluxograma utilizado para definição das vazões defluentes do Sistema Cantareira.	66
Figura 30. Exemplo do fluxograma utilizado para definição das vazões defluentes do Sistema Cantareira para o mês de janeiro.	67
Figura 31. Fluxograma para definir o volume de água liberado em cada intervalo de tempo.	70
Figura 32. Fluxograma da verificação da existência de escassez ou excesso em cada período.	71
Figura 33. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a -0,24 ($\epsilon = -0,24$).	73
Figura 34. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a -0,32 ($\epsilon = -0,32$).	73
Figura 35. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a -0,405 ($\epsilon = -0,405$).	73
Figura 36. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a -0,46 ($\epsilon = -0,46$).	74
Figura 37. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a -0,60 ($\epsilon = -0,60$).	74
Figura 38. Curva de benefício marginal (ou disponibilidade a pagar) e custo da escassez.	76
Figura 39. Representação gráfica dos valores de quantidade de água liberada em função da disponibilidade hídrica, privilegiando os usos presentes da água (regra SOP, fator de <i>hedging</i> nulo).	78
Figura 40. Representação gráfica dos valores de quantidade de água liberada em função da disponibilidade hídrica para diferentes fatores de <i>hedging</i> (HF).	79
Figura 41. Reduções no custo da escassez da água obtidas para os diferentes fatores de <i>hedging</i> em comparação com a regra SOP.	81
Figura 42. Reduções no custo da escassez da água obtidas para os diferentes fatores de <i>hedging</i> em comparação com a regra SOP e fatores de <i>hedging</i> ótimos.	83
Figura 43. Curvas de benefício marginal geradas para os diferentes valores de elasticidade.	84
Figura 44. Curvas de custo da escassez geradas para os diferentes valores de elasticidade.	85
Figura 45. Quantidade de água liberada em função da disponibilidade hídrica para os fatores de <i>hedging</i> (HF) ótimos obtidos para cada valor de elasticidade considerados.	86

Figura 46. Gráfico do volume de água armazenado no sistema de reservatórios em função do tempo, considerando a operação da Sabesp e a operação com <i>hedging</i> (HF = 356,24).	91
Figura 47. Gráfico do volume de água liberado do sistema de reservatórios em função do tempo, para a operação da Sabesp e a operação com <i>hedging</i> (HF = 356,24), incluindo vertimentos.	92
Figura 48. Gráfico do volume de água liberado para atendimento das demandas em função do tempo, considerando a operação da Sabesp e a operação com <i>hedging</i> (HF = 356,24).	93
Figura 49. Gráfico de escassez em função do tempo, considerando a operação da Sabesp e a operação com <i>hedging</i> (HF = 356,24).	94
Figura 50. Escassez e custo da escassez para regra de operação da Sabesp e com <i>hedging</i> (HF=356,24).	95
Figura 51. Escassez e custo da escassez nos 36 meses mais críticos da série temporal, para a regra de operação da Sabesp e com <i>hedging</i> (HF = 356,24).	95
Figura 52. Regra da Sabesp para operação do Sistema Cantareira, em função do armazenamento inicial para cada mês do ano.	96
Figura 53. Política de <i>hedging</i> por zonas controlada pelo armazenamento inicial.	97
Figura 54. Análise estatística das reduções no custo da escassez obtidas com aplicação de políticas de <i>hedging</i> de um ponto para diferentes fatores de <i>hedging</i> (HF variando de 50 até 950).	98
Figura 55. Curva de custo da escassez para cada valor de elasticidade-preço da demanda considerado em função do fator de <i>hedging</i> aplicado.	102
Figura 56. Integração da curva de benefício marginal para cálculo do custo da escassez.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Crescimento populacional na RMSP e capacidade de produção de água.	18
Tabela 2. Valores de elasticidade-preço da demanda da água para abastecimento urbano e residencial.....	46
Tabela 3. Detalhes das estruturas hidráulicas dos reservatórios analisados.....	55
Tabela 4. Relação Área do espelho d'água x Volume útil para cada um dos quatro reservatórios analisados.....	60
Tabela 5. Relação Área do espelho d'água x Volume útil para o Sistema Cantareira*	61
Tabela 6. Resultados de evaporação líquida (mm/mês) estimados pelo programa SisEvapo, segundo as Normais Climatológicas 1931 a 1990.....	62
Tabela 7. Limites de vazão de retirada em função do estado do Sistema Equivalente.	64
Tabela 8. Classes definidas para estabelecimento das vazões defluentes.	65
Tabela 9. Exemplificação de fatores de redução em função de um dado fator de <i>hedging</i> . 69	
Tabela 10. Valores de elasticidade-preço da demanda da água utilizados para obtenção das curvas de disponibilidade a pagar.....	72
Tabela 11. Limites estipulados para integração da curva de disponibilidade a pagar para cada um dos valores de elasticidade-preço da demanda considerados.	75
Tabela 12. Redução da disponibilidade hídrica em função da quantidade de dias do mês. 80	
Tabela 13. Equações obtidas para o cálculo do custo da escassez	80
Tabela 14. Fatores de <i>hedging</i> ótimos encontrados para cada valor de elasticidade-preço da demanda considerados e respectivo custo da escassez calculado.....	83
Tabela 15. Redução da disponibilidade hídrica em função da quantidade de dias do mês. 86	
Tabela 16. Parâmetros de verificação do desempenho do sistema de reservatórios com a aplicação de diferentes fatores de <i>hedging</i>	87
Tabela 17. Custo da escassez calculado para cada valor de elasticidade considerado para o fator de <i>hedging</i> que apresentou menor soma dos quadrados dos déficits.....	89
Tabela 18. Limites de vazão de retirada em função do estado do Sistema Cantareira (reservatórios Jaguari-Jacareí + Cachoeira + Atibainha + Paiva Castro).....	90
Tabela 19. Análise estatística dos resultados obtidos para redução do custo da escassez para a política de <i>hedging</i> de um ponto.....	99
Tabela 20. Síntese dos resultados obtidos com as diferentes regras de operação.	104

Sumário

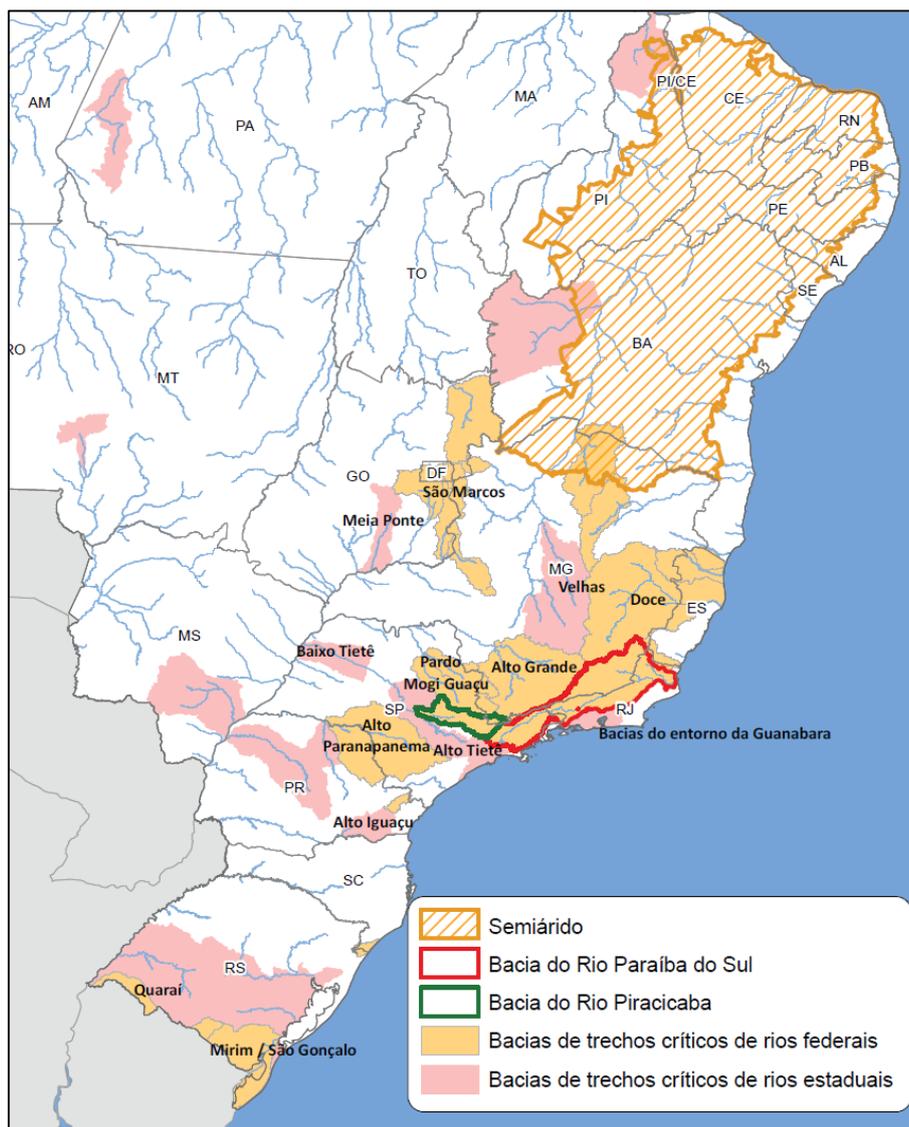
1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVO.....	21
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1	Abastecimento de água e reservatórios.....	22
3.1.1	Operação de reservatórios.....	24
3.1.2	Políticas de salvaguarda (<i>hedging</i>).....	25
3.1.3	Índices de desempenho.....	38
3.2	Valor econômico da água.....	39
3.2.1	Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar).....	43
3.2.2	Custo da escassez.....	49
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1	Objeto de estudo.....	53
4.2	Levantamento de dados e elaboração da Rotina computacional.....	56
4.3	Curva de disponibilidade a pagar (benefício marginal) e custo da escassez.....	71
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78
6	CONCLUSÃO.....	106

1 INTRODUÇÃO

Segundo Unesco (2015), a retirada excessiva de água e os modelos antigos de uso de recursos naturais e de governança, têm afetado a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos no mundo. Intensa urbanização, práticas agrícolas inadequadas, desmatamento e poluição estão entre os fatores que ameaçam a capacidade dos ecossistemas de realizar serviços ambientais, incluindo o provisionamento de água limpa. Além disso, nas últimas décadas o consumo de água aumentou 200% a mais do que o aumento da população e a Unesco prevê que haverá um crescimento na demanda por água de cerca de 55% até o ano de 2050. De acordo com a Unesco (2015), a demanda por água tem crescido e, se não houver gestão entre oferta e demanda e se forem mantidos os padrões atuais de consumo, o planeta enfrentará um déficit de 40% no abastecimento de água em 2030. Esse cenário ainda é agravado pelos efeitos esperados das mudanças no clima sobre a disponibilidade hídrica, a exemplo do diagnóstico realizado em Martins et al. (2013).

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) elabora anualmente os Relatórios de Conjuntura – Informes, os quais têm como objetivo avaliar os acontecimentos do ano precedente no que diz respeito à ocorrência de eventos hidrológicos extremos, às condições de qualidade das águas superficiais e aos demais fatos relevantes em relação aos usos dos recursos hídricos, além da evolução da gestão. Em 2015, a ANA divulgou um encarte especial sobre a crise hídrica no Brasil, no qual mapeou as localidades do país com problemas no que tange à disponibilidade hídrica, onde destacam-se as regiões do sudeste brasileiro, do semiárido nordestino e do bioma pampa no Rio Grande do Sul, além de algumas áreas localizadas no bioma cerrado (Figura 1).

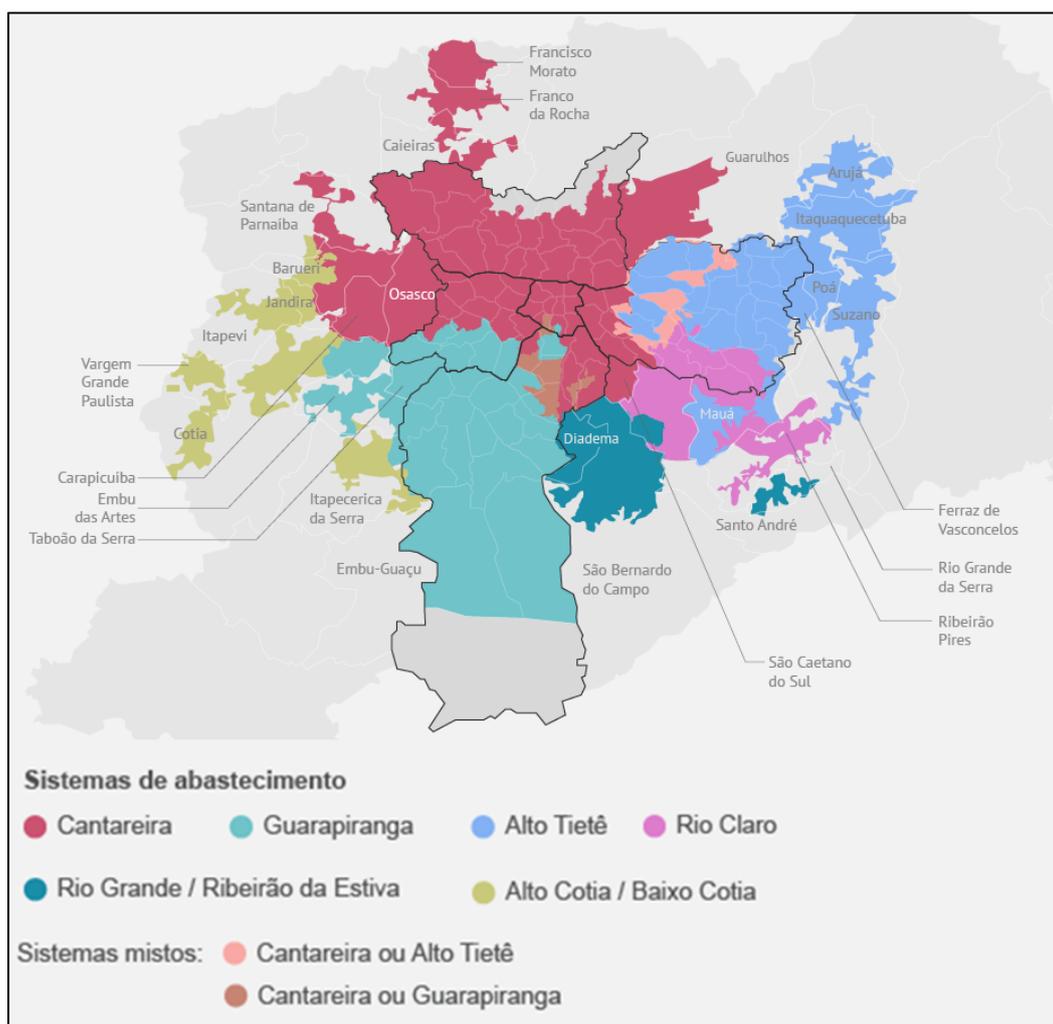
Figura 1. Bacias de rios de domínio da União e dos Estados com trechos críticos identificados.



Fonte: Encarte Especial sobre a Crise Hídrica (ANA, 2015).

No sudeste brasileiro destaca-se a situação do Sistema Produtor de Água Cantareira, principal sistema para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o qual consiste em um complexo conjunto de reservatórios, túneis e canais, com capacidade nominal para captar e tratar uma vazão de $33 \text{ m}^3/\text{s}$ de água. O Sistema Cantareira é responsável pelo abastecimento de aproximadamente nove milhões de pessoas, quase a metade da população da Grande São Paulo (ANA, 2015). A Figura 2 a seguir apresenta os sistemas de abastecimento de água da RMSP, onde destaca-se a importância do Cantareira.

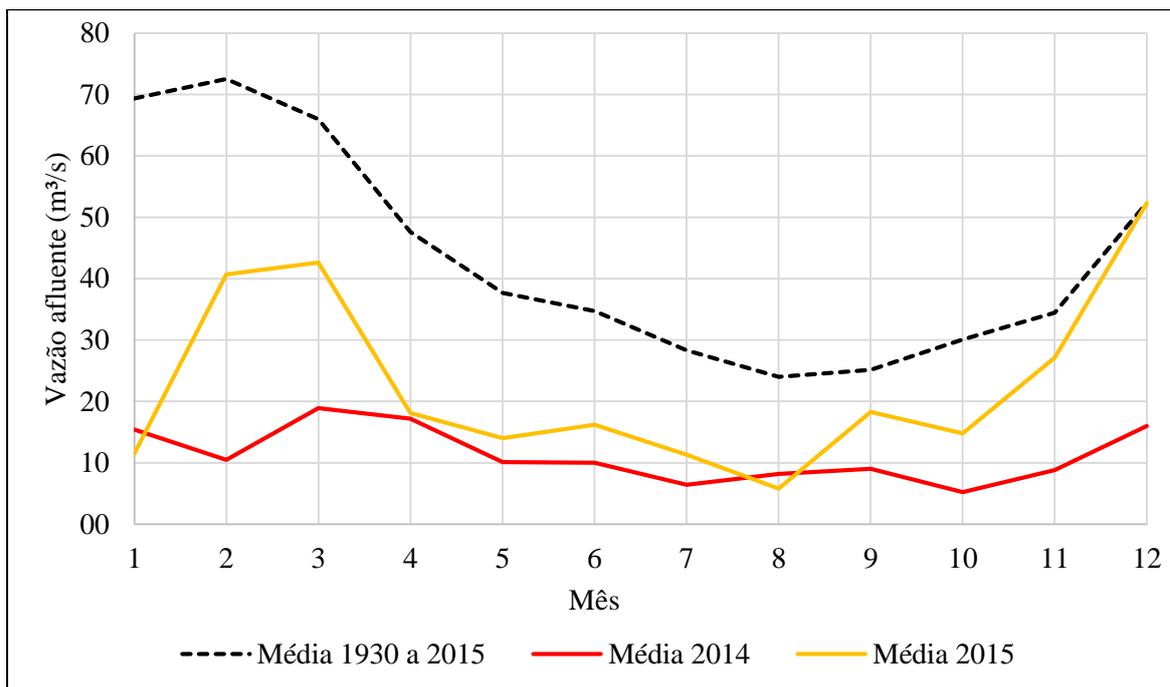
Figura 2. Sistemas de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo.



Fonte: <<http://imguol.com/c/infograficos/2014/noticias/reservatorios/reservatorio20.png>>.

Na região do Sistema Cantareira, o período chuvoso ocorre entre os meses de outubro e fevereiro e os volumes de água precipitados nesta época promovem o aumento dos níveis dos reservatórios, o que geralmente garante bons volumes para os usos múltiplos ao longo do período de estiagem seguinte. No entanto, no período compreendido entre outubro de 2013 e março de 2014, houve uma redução significativa no volume de chuvas nas bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Bacia Hidrográfica PCJ) – onde se localiza a maior parte da área de drenagem do Sistema Cantareira –, de modo que estes volumes precipitados abaixo do esperado para o período levaram a uma considerável redução das vazões médias mensais afluentes aos reservatórios do Sistema Cantareira (ANA, 2015). A magnitude destes déficits pode ser visualizada na Figura 3.

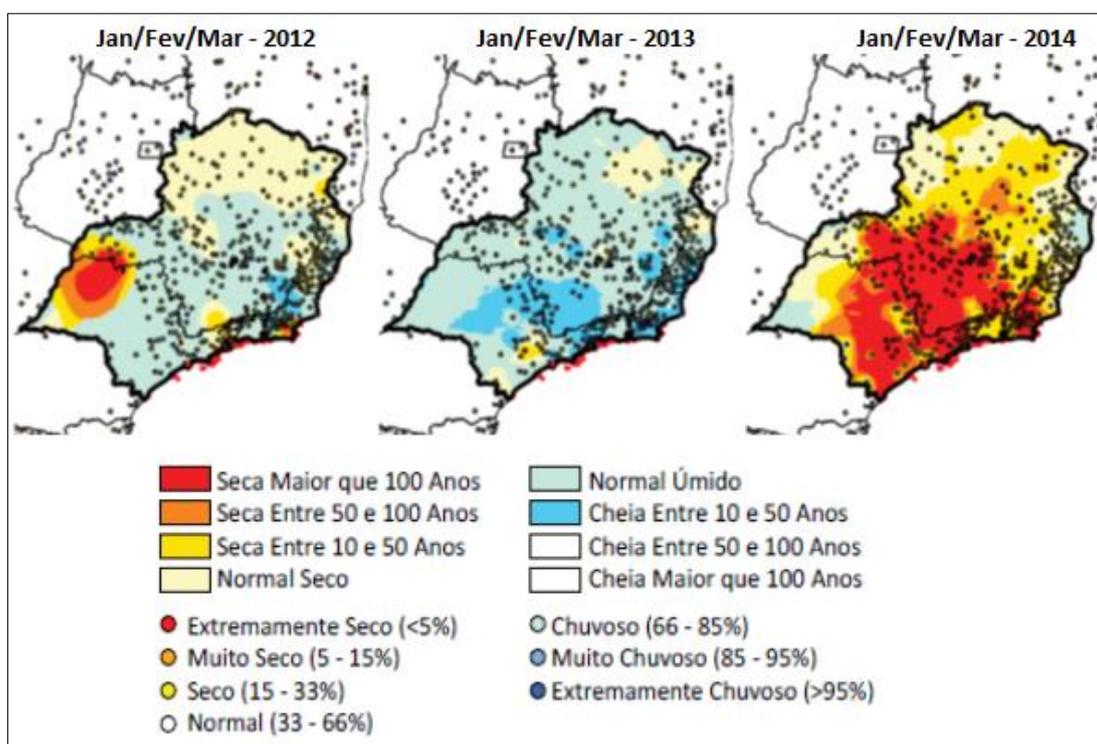
Figura 3. Histórico das vazões médias mensais afluentes aos reservatórios do Sistema Cantareira (Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro).



A redução nos volumes precipitados, em relação à média histórica mensal, considerando dados monitorados desde 1930, ressalta a imprevisibilidade deste fenômeno e as incertezas a ele associadas. “A compreensão das causas dessas alterações climáticas e da dinâmica tendencial da pluviometria interanualmente ainda é imprecisa devido, principalmente, ao curto período de observações dessas anomalias” (ANA, 2015).

A Agência Nacional de Águas (ANA) realizou uma análise do grau de severidade da falta de chuvas no país nesses últimos anos. Este estudo revelou que as chuvas de 2014 foram especialmente anômalas no sudeste brasileiro. Levando em consideração apenas estações com mais de 50 anos de dados, verificou-se que para o estado de São Paulo, em 50% a chuva desse ano ficou entre as 3 piores já registradas, sendo que em 30% o evento foi o mais seco já registrado. Grande parte das estações registrou seca com período de retorno superior a 100 anos, o que permite classificar este evento como raro (Figura 4).

Figura 4. Criticidade das chuvas de janeiro a março entre 2012 e 2014 no Sudeste brasileiro.



Fonte: Encarte Especial sobre a Crise Hídrica (ANA, 2015).

Este evento de seca na região impediu a recuperação dos níveis dos reservatórios, mas não se pode atribuir as causas da crise hídrica apenas aos menores índices pluviométricos; há outros fatores relacionados à gestão da demanda e à garantia do atendimento que são importantes para agravar ou atenuar sua ocorrência. Os rios localizados na RMSP estão em situação crítica tanto em termos quantitativos quanto qualitativos, tendo em vista a alta demanda de água existente e a elevada carga orgânica despejada nos cursos d'água (JACOBI et al., 2015). De acordo com Capobianco e Jacobi (2014) são elementos que contribuem para a crise hídrica: a má qualidade das águas dos rios pelo lançamento de esgotos sem tratamento nos corpos d'água, o desmatamento e a ocupação irregular em áreas de mananciais, a falta de planejamento para a construção de novos reservatórios, a falta de investimentos para a redução de perdas nas redes de abastecimento e a falta de coordenação institucional.

De acordo com Araújo et al. (2014), os corpos d'água são poluídos principalmente nos trechos fortemente urbanizados, em zonas industrializadas ou de intensa atividade agrícola. O Rio Tietê, na cidade de São Paulo, recebe efluentes residenciais e industriais não tratados em 19 dos 39 municípios da RMSP, e estima-se que o volume disposto no rio se aproxime de 690 toneladas diárias. Haja vista que os rios localizados em áreas urbanas se encontram poluídos, a captação da água para abastecimento público precisa ser realizada cada vez mais distante dos

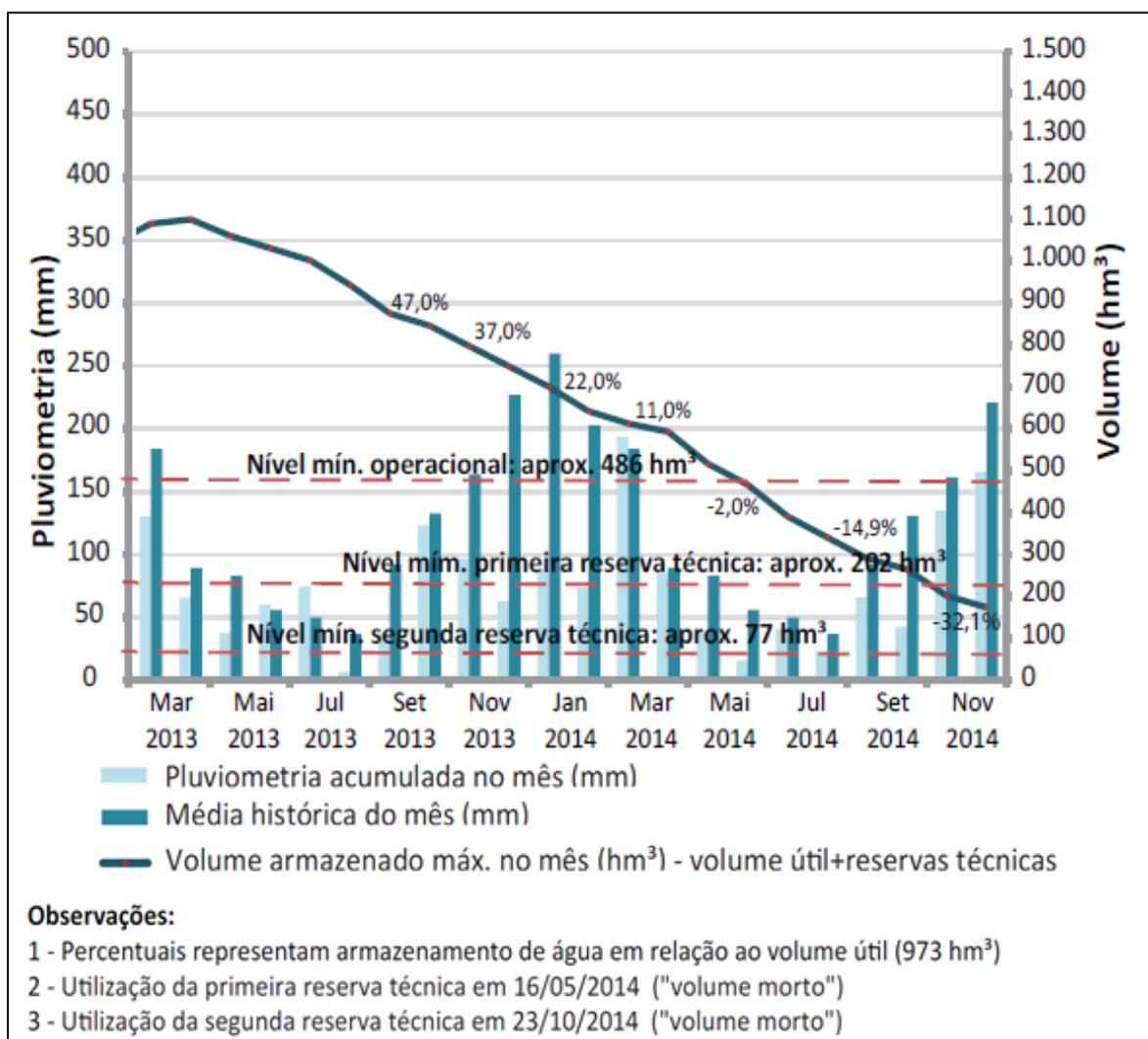
centros urbanos onde é distribuída. Araújo et al. (2014) explicitaram a posição de Vicente Andreu Guillo, então diretor da ANA: “A poluição dos mananciais é uma questão crítica. No caso da Região Metropolitana de São Paulo, as águas dos Rios Tamanduateí, Pinheiros e Tietê não existem para consumo, por causa da poluição”.

Tendo em vista a impossibilidade da utilização das vazões dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí para abastecimento da RMSP, e os baixos volumes dos reservatórios do Sistema Cantareira, para não interromper o abastecimento público, foi necessária a utilização do volume morto dos reservatórios do Sistema Cantareira para atendimento à demanda, ou ao menos parte dela, em situação de emergência, sendo então o volume morto considerado uma “reserva técnica”.

O volume morto é o volume de água armazenado abaixo das comportas de um reservatório, de forma que para sua adução é necessário bombeamento. No Sistema Cantareira, o volume morto representa aproximadamente 33% da capacidade de armazenamento (cerca de 486 hm³). Destes, foram utilizados 182,5 hm³ de água em uma primeira etapa (em maio de 2014) e, em outubro do mesmo ano, foi concedida liberação para retirada de mais 105 hm³ para abastecimento público (ANA, 2015). Em dezembro de 2015, com o aumento do volume de água armazenado nos reservatórios, foi possível voltar a operar apenas com o volume útil do sistema.

O gráfico apresentado na Figura 5 a seguir apresenta a dinâmica pluviométrica e a evolução no volume de água armazenado no Sistema Cantareira no período compreendido entre janeiro de 2013 e dezembro de 2014, onde pode-se observar a redução abrupta no volume de água armazenado no sistema de reservatórios, culminando no completo esvaziamento do volume útil, com necessidade da utilização do volume morto para não interromper completamente o abastecimento da RMSP.

Figura 5. Evolução do estoque de água no Sistema Cantareira de 2013 a 2014.



Fonte: Encarte Especial sobre a Crise Hídrica (ANA, 2015).

Conforme Jacobi et al. (2015), a região Sudeste do Brasil, ocupa uma área de aproximadamente 215.000 km² (2,5% da área do país), e abriga mais de 85 milhões de habitantes, 92% destes em áreas urbanas. Além do grande contingente populacional urbano, a região é de extrema importância econômica; é a mais industrializada do país e também a de maior densidade demográfica. Segundo a Emplasa (2016), a Região Metropolitana de São Paulo é o maior polo de riqueza nacional; seu Produto Interno Bruto (PIB) atingiu, em 2012, o patamar de 786,50 bilhões de reais, aproximadamente 17,91% do total brasileiro.

De acordo com Rodrigues e Villela (2015), o que ocorre ao longo dos últimos 30 anos na RMSP é, concomitantemente, um aumento no padrão de consumo e um aumento populacional, em taxas superiores à capacidade de produção de água de todos os sistemas envolvidos, resultando em índices de produção de água per capita declinantes a partir de 1980 (Tabela 1).

Tabela 1. Crescimento populacional na RMSP e capacidade de produção de água.

Ano	População (milhões de habitantes)	Capacidade máxima de produção de água (m ³ /s)	Produção de água per capita (m ³ /hab./dia)
1958	3,5	8,3	0,205
1980	12,5	59,7	0,412
2000	17,9	64,0	0,308
2014/2015	20,9	69,7	0,288

Fonte: adaptado de Rodrigues e Villela (2015).

Segundo Côrtes et al. (2015), o consumo de água na RMSP aumentou 26% (de 150 l/hab./dia para 175 l/hab./dia) entre os anos de 2004 a 2013; o que, de acordo com estes autores, estaria relacionado ao crescimento econômico e à consequente ascensão social do período, além do crescimento de setores econômicos de alto consumo, como o da construção civil.

No entanto, é importante ressaltar o elevado volume de água tratada perdida nas redes de abastecimento decorrente de tubulações antigas, danificadas e sem manutenção. De acordo com o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de 2014 (BRASIL, 2015), no estado de São Paulo, cerca de 33% do volume total de água tratada são perdidos ao longo das redes de abastecimento.

Conforme destacado por Fracalanza e Freire (2015), a Portaria DAEE nº. 1.213/2004 decretou que a operação do Sistema Cantareira deveria obedecer a um limite de vazão de retirada baseado na análise das curvas de aversão ao risco, as quais garantiriam uma quantidade de vazão de retirada segura, visando a proteção do sistema e evitando seu colapso. Todavia, segundo Rodrigues e Villela (2015), assumiu-se um alto risco na gestão dos recursos hídricos do Sistema Cantareira, pois, de acordo com estes autores, durante pelo menos os últimos 15 anos, o Sistema Cantareira vinha sendo utilizado em sua capacidade máxima, de modo que, independentemente da estação ano, o sistema operava com tratamento ininterrupto de 33 m³/s que é a capacidade máxima operacional do sistema de tratamento e distribuição.

Dentre as consequências da crise hídrica no estado de São Paulo, se encontra a necessidade da utilização do volume morto dos reservatórios para abastecimento da RMSP. Esta medida emergencial levou ao aumento dos custos de adução e de tratamento da água, haja vista que a água do volume morto possui qualidade inferior devido à deposição de sedimentos e poluentes no fundo do reservatório.

Tanto pelo fato de um aumento nos custos de produção de água, quanto pela sua menor disponibilidade, houve um aumento significativo na conta de água da população. Além de um aumento nas tarifas, a crise hídrica deixou parte da população desabastecida, tendo que recorrer a outras fontes de água, que não a rede pública de distribuição, para usos domésticos, comerciais e industriais.

As falhas no abastecimento levaram a sociedade à busca por fontes alternativas de água, gerando um crescimento considerável na procura pela perfuração de poços para captação de água subterrânea. Esta seria uma boa solução se a exploração fosse realizada de maneira adequada, com controle e fiscalização. Entretanto não é isso que se verifica, especialmente em uma situação de crise hídrica, pela urgência em se obter o acesso à água, acaba-se por realizar uma exploração desordenada deste recurso, sem os estudos e precauções necessários para tal. Desta maneira, além da preocupação com a situação das águas superficiais, cresce a necessidade de atenção com a situação dos aquíferos e lençóis freáticos.

O desabastecimento e o aumento da tarifa cobrada pela água levaram a uma redução no lucro das empresas e até mesmo a prejuízos. Há relatos do aumento do índice de desemprego, e imposição de férias coletivas aos funcionários, sendo que algumas indústrias e estabelecimentos comerciais foram obrigados a interromper a operação ou reduzir o horário de funcionamento (DESIDÉRIO, 2015).

Com vistas a compensar o desabastecimento, verificou-se um aumento na procura pela água distribuída por caminhão-pipa, de modo que o preço subiu de 50% até 275% (DANTAS, 2014; RESK, 2014), podendo custar até cem reais o metro cúbico.

Nas residências, a população se viu obrigada a mudar seus hábitos de consumo e reservar água em baldes e tonéis, o que aumentou as condições favoráveis para a proliferação de vetores, levando a um crescimento no número de casos de doenças como a dengue, a zika e a chikungunya, transmitidas pelo mosquito *Aedes aegypti*, que tem como principal local de reprodução os recipientes com água parada (FERNANDES, 2016).

Como medida para tentar reduzir as perdas na rede de distribuição de água, a pressão da rede foi reduzida, de modo que os bairros mais altos ou mais afastados acabaram ficando desabastecidos. Segundo notícia do Jornal Folha de São Paulo de 28 de fevereiro de 2015 (LOBEL et al., 2015), esta manobra resulta na economia de oito metros cúbicos de água por

segundo, enquanto as medidas de incentivo ao racionamento, com bônus para os clientes que reduzirem seu consumo, gera uma economia de 5 m³/s.

Segundo reportagem do Jornal Gazeta do Povo, de 24 de janeiro de 2015 (VOITCH, 2015), a crise hídrica eleva o risco de recessão e o racionamento de energia e de água pode piorar o desempenho da economia do país e reduzir significativamente o seu Produto Interno Bruto (PIB), situação agravada pelo fato de que a região Sudeste contribui com 55,3% do PIB nacional, e o estado de São Paulo 32,1%, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2013 (SALES, 2015).

2 OBJETIVO

Devido ao estresse hídrico crescente e as secas mais frequentes em diversas regiões do planeta, torna-se cada vez mais importante a investigação de formas mais eficientes de operar a infraestrutura hídrica existente, especialmente a de armazenamento. Técnicas de otimização para operação de reservatórios vem sendo desenvolvidas já a bastante tempo (WURBS, 1996), muito embora sua aplicação em sistemas de abastecimento urbano no Brasil ainda seja incipiente. Dentre estas técnicas, o presente trabalho explora a aplicação de uma estratégia chamada “hedging” (salvaguardas) onde reduções prévias no abastecimento são efetuadas de modo a criar uma salvaguarda (aumento no volume armazenado) e, assim, reduzir a probabilidade de um racionamento severo no futuro, sem que sejam aplicadas restrições desnecessárias aos usuários, o que poderia acabar por aumentar ainda mais as perdas econômicas. Por meio do cálculo dos custos da escassez da água decorrentes tanto de reduções prévias no abastecimento quanto de racionamentos severos futuros, é possível verificar se a estratégia de hedging é vantajosa em relação a outras formas de operação de reservatórios.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é verificar se existe uma estratégia de *hedging* capaz de minimizar o custo da escassez da água para o Sistema Cantareira em comparação com outras estratégias e também com a atual regra utilizada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) para operar esse sistema.

Para atingir o objetivo, os próximos capítulos apresentam conceitos sobre operação de reservatórios e *hedging*; conceitos de custo da escassez, a elaboração de uma rotina computacional para calcular o custo da escassez sob diferentes estratégias de operação (com e sem *hedging*, com e sem a regra de operação da Sabesp), a verificação de outros critérios de desempenho (soma do quadrado dos déficits no período de análise e também a soma dos volume vertidos para cada regra de operação); e, por fim, o cálculo da confiabilidade do sistema para cada política de operação analisada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta revisão são abordados os assuntos referentes ao abastecimento de água e reservatórios – com suas respectivas regras de operação e detalhamento sobre a política de *hedging*, a qual foi a técnica aplicada neste estudo –; índices de desempenho para sistemas de reservatórios (confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade); o valor econômico da água e o método de obtenção da curva de disponibilidade a pagar e da equação que descreve o custo da escassez, de forma a proporcionar o entendimento do tema de uma forma integrada.

3.1 ABASTECIMENTO DE ÁGUA E RESERVATÓRIOS

Conforme disposto no Atlas do Abastecimento de Água da Agência Nacional de Águas, "a sustentabilidade e a segurança hídricas são condicionantes ao desenvolvimento econômico e social do País" (ANA, 2010a). Nesse sentido, ressalta-se a importância do abastecimento urbano de água e a necessidade de que este seja realizado de maneira eficaz e ininterrupta, de forma a cumprir seus objetivos e atender às diversas demandas existentes.

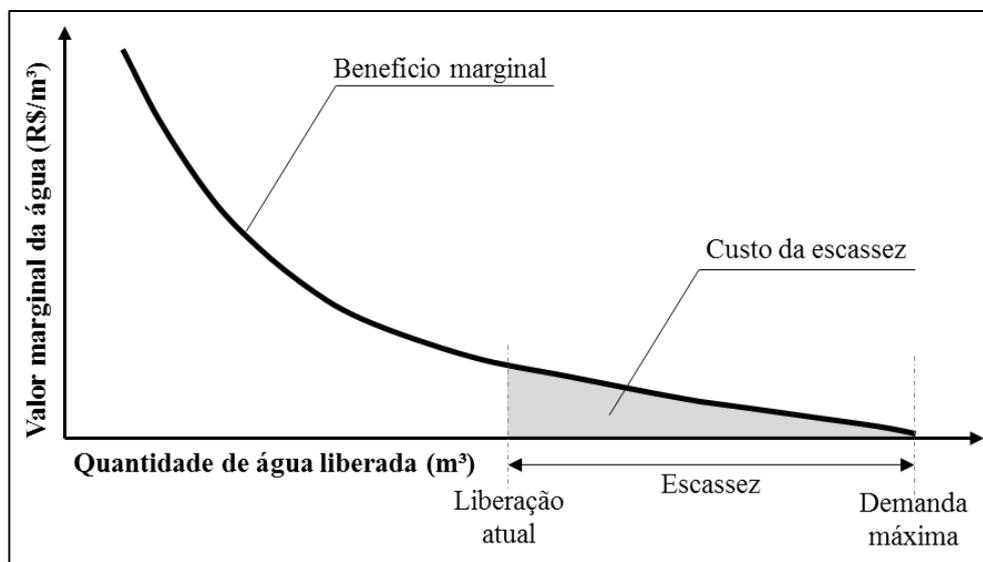
De acordo com Heller e Pádua (2010), as instalações para abastecimento de água devem ser capazes de fornecer água com qualidade, regularidade, e de forma acessível para as populações, proporcionando os usos múltiplos e assegurando à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água (BRASIL. Lei nº 9.433, 1997, art. 2º).

No entanto, a disponibilidade de água tem sido insuficiente para atender às atuais demandas hídricas, conforme apresentado no Encarte Especial sobre a Crise Hídrica do Informe da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil de 2014, publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2015).

Define-se por escassez de água a diferença entre o volume de água disponibilizado ao usuário e o volume que o mesmo utilizaria caso não houvesse restrições, tanto de disponibilidade quanto de preço (JENKINS et al., 2004 apud MARQUES et al., 2006). Na Figura 6 essa quantidade seria a “demanda máxima”. Esta definição traz imbuído em seu significado o valor econômico da água. Tradicionalmente, a engenharia tem tratado a demanda por água como sinônimo do requerimento hídrico do usuário, quantidade a ser atendida. Entretanto, na medida em que é tida como recurso escasso, a definição de qual quantidade será atendida envolve também o benefício econômico produzido e os custos de oportunidade. Em outros termos, é adotar uma abordagem que reflita a escassez econômica associada a este recurso. Nesse sentido, a “demanda hídrica” deixa de ser um

requerimento fixo de engenharia a passa a variar conforme o valor marginal da água (conceito econômico).

Figura 6. Relação benefício marginal x custo da escassez.



Fonte: adaptado de Marques et al. (2006).

A escassez da água pode se dar de maneira qualitativa ou quantitativa. A escassez qualitativa refere-se às situações onde, mesmo que haja quantidade de água suficiente para atender às demandas, a sua qualidade não é adequada aos usos pretendidos. A escassez quantitativa pode ocorrer quando a disponibilidade hídrica é menor do que o esperado, devido às variabilidades climáticas, ou quando há um aumento das demandas de modo que a disponibilidade hídrica deixa de ser suficiente para seu total atendimento. Muitas vezes esse aumento da demanda está vinculado ao crescimento populacional; ao desenvolvimento econômico, e também ao uso ineficiente dos recursos hídricos.

Nesse sentido, tendo em vista que a distribuição dos recursos hídricos não é homogênea no espaço e no tempo, torna-se necessário realizar um planejamento adequado dos recursos hídricos, de forma a reservar água em períodos de maior abundância para utilização em períodos onde naturalmente haveria escassez destes recursos. Segundo Heller e Pádua (2010), “para assegurar condições adequadas de abastecimento de água ou de saneamento, uma abordagem de engenharia torna-se essencial, pois as instalações devem ser planejadas, projetadas, implantadas, operadas e mantidas”.

Desta forma, a existência de reservatórios para armazenamento de água e regularização do fluxo natural dos cursos d’água é de extrema importância. De acordo com

Loucks e Van Beek (2005), os reservatórios representam componentes importantes da infraestrutura social e econômica, tanto de países desenvolvidos quanto de países em desenvolvimento e uma das principais razões para a construção de reservatórios é a necessidade de garantir um abastecimento de água mais confiável. No entanto, ultimamente tem se tornado cada vez mais difícil a construção de novos barramentos para a reservação de água, tanto por questões sociais quanto ambientais, de forma que, para melhor gerenciar a quantidade de água disponível, torna-se necessário otimizar a operação dos reservatórios já existentes, de modo a buscar um equilíbrio entre a necessidade de água para o desenvolvimento econômico e a necessidade de proteger e preservar o ambiente e seu ecossistema (YOU; CAI, 2008a).

De acordo com Loucks e Van Beek (2005), períodos de estiagens são imprevisíveis – tanto em relação à quando irão ocorrer como em relação à sua intensidade – de modo que é difícil determinar quais as melhores medidas a serem tomadas no momento que se percebe que está se iniciando um período de seca. Os impactos socioeconômicos de um período de estiagem ocorrem quando a demanda para as atividades sociais e econômicas superam a disponibilidade hídrica.

3.1.1 Operação de reservatórios

Haja vista que a operação de reservatórios apresenta alto impacto na sociedade e na economia, elaborar políticas de operação de reservatórios é essencial. De acordo com Bower et al. (1962), uma política de operação é um conjunto de regras para armazenar e liberar água de reservatórios em um dado sistema de recursos hídricos; e os três maiores tipos de decisões a serem tomados acerca do rateio entre o armazenamento e a liberação de água são o rateio entre reservatórios, entre finalidades, e entre períodos de tempo.

Uma síntese das principais regras de operação já desenvolvidas é apresentada a seguir; para as políticas de interesse será conferido maior detalhamento posteriormente.

A regra padrão de operação – SOP: *Standard Operating Policy* (STEDINGER, 1984) –, é a mais simples e mais amplamente utilizada. Esta política de operação consiste em atender à demanda sempre que possível, de forma a não armazenar água para usos futuros caso não haja excedente após o completo atendimento da demanda.

A regra de decisão linear – LDR: *Linear Decision Rule* (REVELLE et al, 1969) –, otimiza a regra de operação utilizando a programação linear.

Bower et al. (1962) descreveram as políticas *The Pack Rule* e *The Space Rule*. A primeira mantém o reservatório com uma parte do seu volume vazio para comportar vazões afluentes previstas que, caso contrário, verteriam. A segunda funciona para o caso de reservatórios paralelos, pois evita a ineficiência do sistema criada por operações inadequadas que levariam um reservatório a verter enquanto outro, paralelo a este, não se encontra completamente cheio.

A política de salvaguarda – *The Hedging Rule* (BOWER et al, 1962) – é geralmente utilizada para o racionamento no abastecimento de água. Esta regra configura penalidades maiores para grandes déficits e suaviza suas flutuações. Desta forma, a utilização do *hedging* só se justifica se os usos da água tiverem funções de perdas não lineares; de forma a penalizar os déficits maiores. Consequentemente, conforme explicitado por Neelakantan e Pundarikanthan (1999, tradução nossa¹), “indicadores de desempenho como a soma dos quadrados dos déficits devem ser utilizados para avaliar esta regra”.

3.1.2 Políticas de salvaguarda (*hedging*)

Bower et al. (1962) foram pioneiros em descrever economicamente uma política de *hedging* para a operação de reservatórios, abordando a alocação intertemporal de recursos e a otimização dos benefícios, levando em consideração não apenas o período atual, mas também os períodos futuros.

Segundo estes autores, algumas vezes é mais vantajoso economicamente aceitar um déficit pequeno na liberação de água no presente para reduzir a probabilidade de um período de escassez mais severo no futuro. A aplicação desta prática configura a política conhecida como *hedging* (salvaguardas), e implica na redução da quantidade de água a ser liberada para benefício imediato, retendo água no estoque para possível uso futuro. A definição de uma estratégia de *hedging* envolve a determinação de **quando** efetuar a redução, **quanto** será reduzido e **por quanto tempo** ocorrerá a redução.

De acordo com Bower et al (1962, tradução nossa²) “Economicamente, uma regra de *hedging* pode ser justificada apenas se os usos propostos da água tiverem funções de perda não-lineares”. Isso decorre do fato de que para funções de perda lineares, o valor

¹ Texto original: “performance indicators like ‘sum of square deficits’ must be used to evaluate this rule.” (NEELAKANTAN; PUNDARIKANTHAN, 1999, p. 410).

² Texto original: “Economically, a *hedging* rule can be justified only if the proposed uses of water have nonlinear loss functions.” (BOWER et al, 1962, p. 455).

marginal da água será constante, de forma que a solução ótima seria postergar a falta de água o máximo possível, haja vista que as vazões apresentam comportamento estocástico e que esta escassez poderia ser minimizada no futuro caso ocorresse uma vazão afluyente maior do que a prevista.

Segundo Shih e ReVelle (1994), se déficits severos causarem danos mais-que-proporcionalmente maiores do que aqueles causados por danos moderados, pode ser melhor economicamente aceitar um pequeno déficit no presente para que seja minimizada a magnitude de possíveis déficits severos no futuro. Este é o fundamento básico sob o qual as regras de *hedging* são construídas.

De acordo com o disposto por Bower et al. (1962), um procedimento de operação de reservatórios é ótimo quando, para um dado intervalo, o valor marginal da água liberada é igual ao valor marginal da água armazenada; e o valor econômico da função objetivo a ser maximizado para cada intervalo de tempo é igual à soma dos benefícios durante o intervalo corrente com os benefícios que se espera obter com a água que é mantida no reservatório.

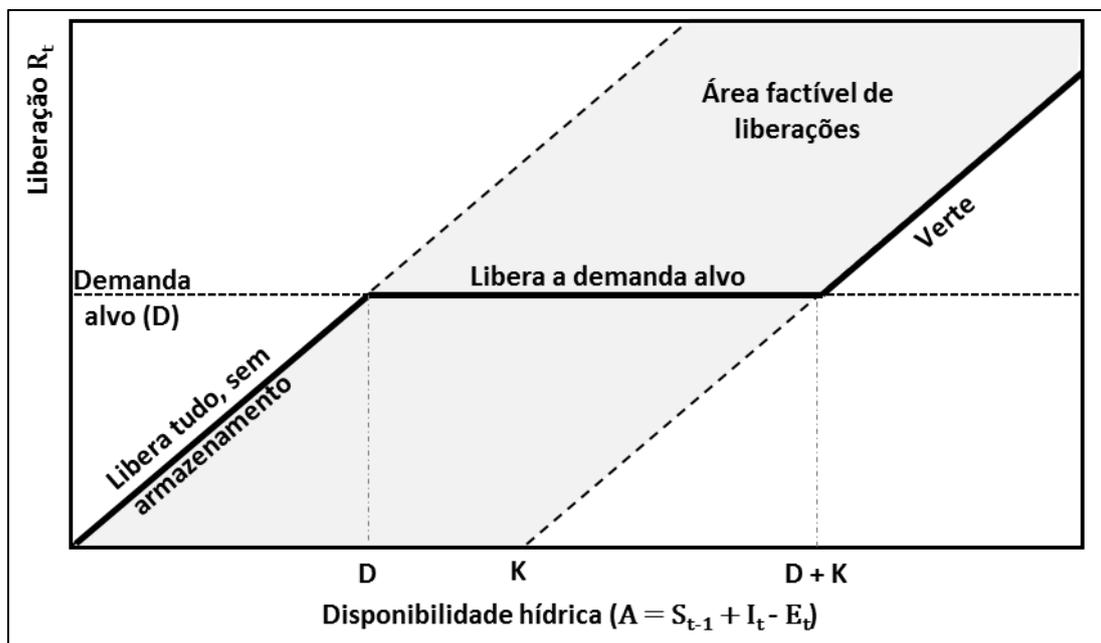
As regras de *hedging* são normalmente utilizadas para operações de racionamento, visando suavizar as flutuações dos déficits em períodos de escassez; reduzindo a intensidade de uma provável escassez mais severa no futuro, fornecendo apenas uma porção da demanda (YOU; CAI, 2008a). Ou seja, o objetivo do *hedging* é reduzir o risco e custo de racionamentos severos, ao custo de racionamentos menores e mais frequentes (DRAPER; LUND 2004).

A base para a definição da regra de *hedging* é a regra padrão de operação (*Standard Operating Policy* - SOP), também conhecida como Curva S de operação; a qual foi desenvolvida para a operação de reservatórios sob uma determinada demanda alvo fixa, liberando o mais próximo da demanda alvo quanto possível, guardando apenas a água excedente para as demandas futuras (BOWER et al., 1962).

Segundo Draper e Lund (2004), para os sistemas de abastecimento de água, a regra padrão de operação (SOP) é talvez a mais simples regra de operação, visto que a água liberada do reservatório é função da quantidade de água disponível (isto é, a água armazenada somada à vazão afluyente menos a evaporação no período presente). Se a quantidade de água disponível for menor do que a demanda alvo (D), toda a água é liberada e o reservatório permanece vazio. Se a disponibilidade de água exceder a demanda alvo, a água excedente é armazenada no reservatório até que se atinja a sua capacidade máxima (K), caso a capacidade do reservatório seja superada, o mesmo irá verter.

O diagrama da regra padrão de operação (SOP) pode ser visualizado na Figura 7 a seguir.

Figura 7. Regra padrão de operação – SOP (linha mais grossa).



Fonte: adaptado de Draper e Lund (2004).

Matematicamente, a regra de liberação de água do reservatório na política padrão de operação (SOP) é expressa pelas Equações 1, 2 e 3:

$$R_t = S_{t-1} + I_t - E_t \quad \text{se} \quad S_{t-1} + I_t - E_t \leq D \quad \text{Equação 1}$$

$$R_t = D \quad \text{se} \quad D \leq S_{t-1} + I_t - E_t \leq K \quad \text{Equação 2}$$

$$R_t = S_{t-1} + I_t - E_t - K \quad \text{se} \quad S_{t-1} + I_t - E_t - D_t > K \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

R_t é o volume de água liberado no período atual;

S_{t-1} é o armazenamento de água no final do período anterior;

I_t é a vazão afluyente no período atual;

E_t é a evaporação da água no período atual;

D é a demanda alvo; e

K é a capacidade do reservatório.

Conforme pode ser visualizado na Figura 7, as liberações factíveis estão limitadas pelas duas retas paralelas (área hachurada), sendo que a reta superior representa a liberação de toda água disponível – não deixando nada estocado no reservatório – e a reta inferior

representa o armazenamento de toda água possível, liberando apenas a água excedente à capacidade do reservatório, por meio do vertimento.

Essencialmente, a regra SOP coloca como prioridade máxima a liberação de água para os usos com benefícios imediatos até o nível onde a quantidade de água disponível é suficiente para o completo atendimento da demanda alvo. A partir do ponto em que a disponibilidade hídrica supera a demanda, a quantidade disponível excedente é estocada até que o reservatório esteja completamente cheio e comece a verter (DRAPER; LUND, 2004).

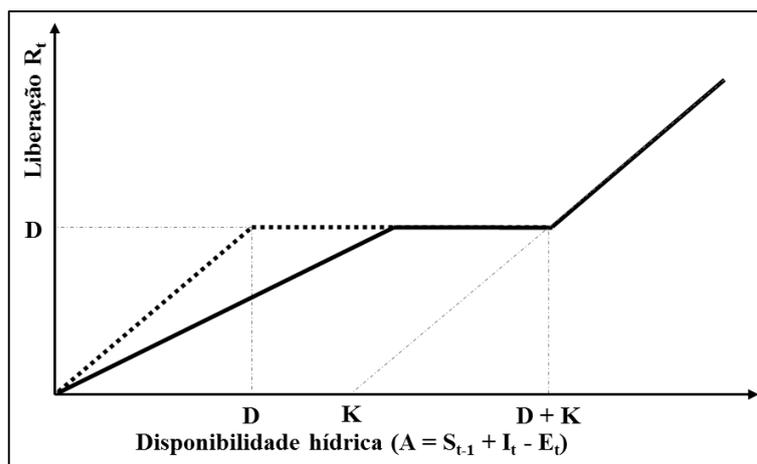
As regras de *hedging* limitam as entregas em alguma escala de abastecimento para reter água no reservatório para uso em períodos posteriores. Então, uma quantidade de água é armazenada, ao invés de ser liberada, até mesmo quando há água suficiente para atender completamente a demanda alvo no presente. O *hedging* provê segurança para os usos de maior valor em locais onde os reservatórios possuem baixo potencial de reenchimento ou vazões afluentes incertas (DRAPER; LUND, 2004).

Segundo Shih e ReVelle (1994), a deficiência da regra SOP é que ela não fornece um mecanismo de racionamento no abastecimento quando pode haver água insuficiente para suprir a demanda e tampouco sugere um mecanismo para liberar mais água do que a demanda quando há água excedente. Estes autores afirmam que as regras de operação devem sugerir que, durante períodos de seca iminente, reduções sejam feitas na demanda, mesmo que a demanda alvo possa ser suprida com a vazão afluente e a água armazenada no reservatório. Tais reduções devem servir para prevenir uma escassez de maior magnitude no futuro.

De acordo com Draper e Lund (2004), o *hedging* será vantajoso quando a função de custo for convexa e não linear e a hidrologia apresentar probabilidade alta para persistência de períodos secos. E as formas de *hedging* mais comuns são elencadas a seguir, conforme descrito por Lund e Guzman (1996 apud DRAPER; LUND, 2004), juntamente com as figuras que ilustram o comportamento das diferentes formas de *hedging*. Onde R_t é o volume de água liberado no período; S_{t-1} é o armazenamento de água no início período; I_t é a vazão afluente no período; E_t é a evaporação da água no período; D é a demanda alvo; e K é a capacidade do reservatório.

- *Hedging* de 1 ponto (ou valor gatilho): Vazões liberadas iniciam na origem e aumentam linearmente (com declividade < 1) até interceptar o plano $D(t)$ (SHIH; REVELLE, 1994). É um caso específico do *hedging* de dois pontos, onde o ponto de início do *hedging* é a origem, vide Figura 8;

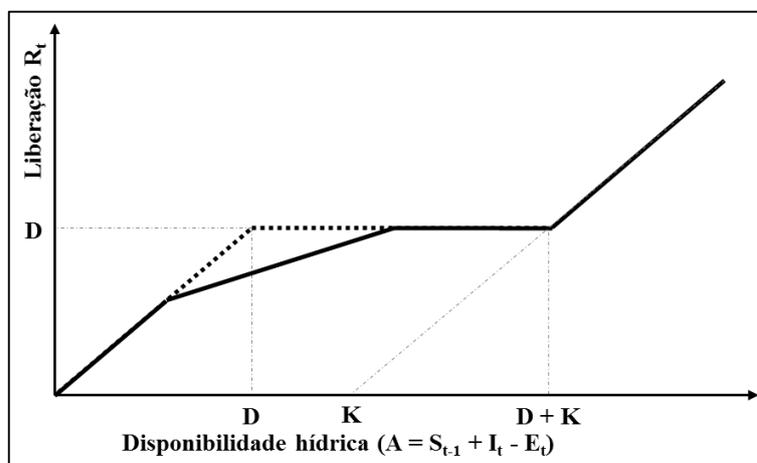
Figura 8. Política de *hedging* de um ponto.



Fonte: adaptado de Neelakantan e Sasireka (2015).

- *Hedging* de 2 pontos: a regra linear inicia a partir de um ponto (parâmetro) em algum lugar acima da origem (na porção de racionamento do SOP) e termina em um segundo ponto interceptando o plano $D(t)$ (BAYAZIT; UNAL, 1990; SRINIVASAN; PHILIPOSE, 1996), como pode ser observado na Figura 9;

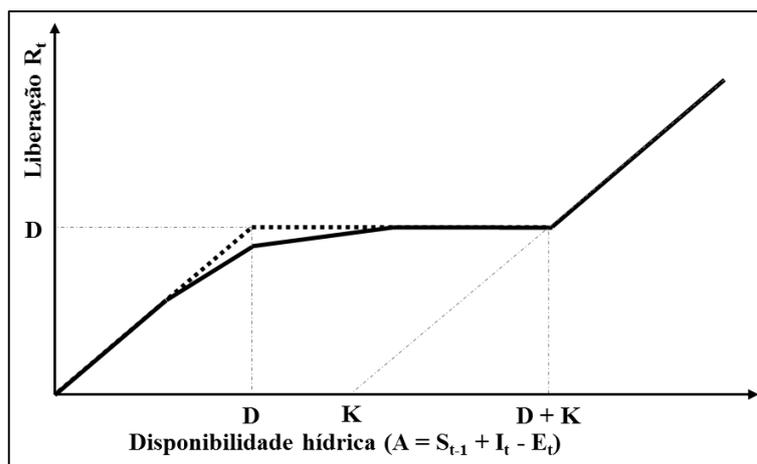
Figura 9. Política de *hedging* de dois pontos.



Fonte: adaptado de Neelakantan e Sasireka (2015).

- *Hedging* de 3 pontos: Um terceiro ponto é introduzido definindo dois segmentos lineares, conforme ilustrado na Figura 10;

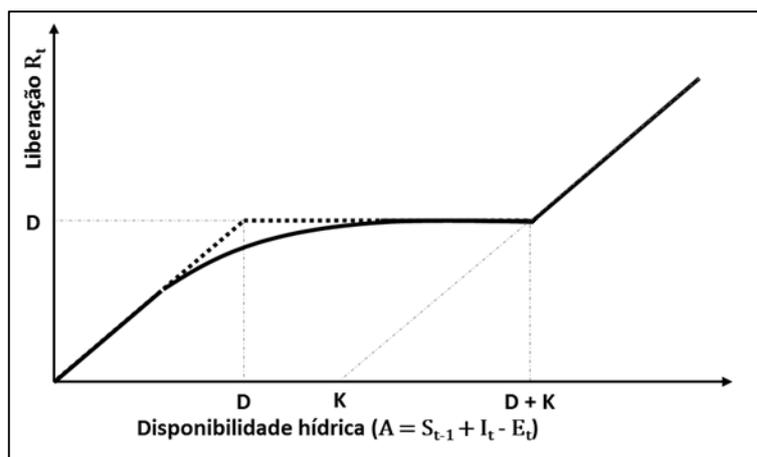
Figura 10. Política de *hedging* de três pontos.



Fonte: adaptado de Neelakantan e Sasireka (2015).

- *Hedging* contínuo: a declividade varia continuamente no trecho de *hedging* (HASHIMOTO et al. 1982), como demonstrado na Figura 11;

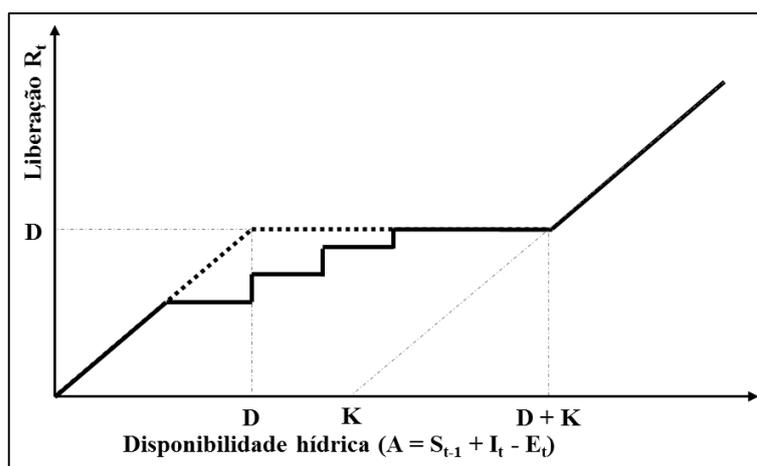
Figura 11. Política de *hedging* contínuo.



Fonte: adaptado de Draper e Lund (2004).

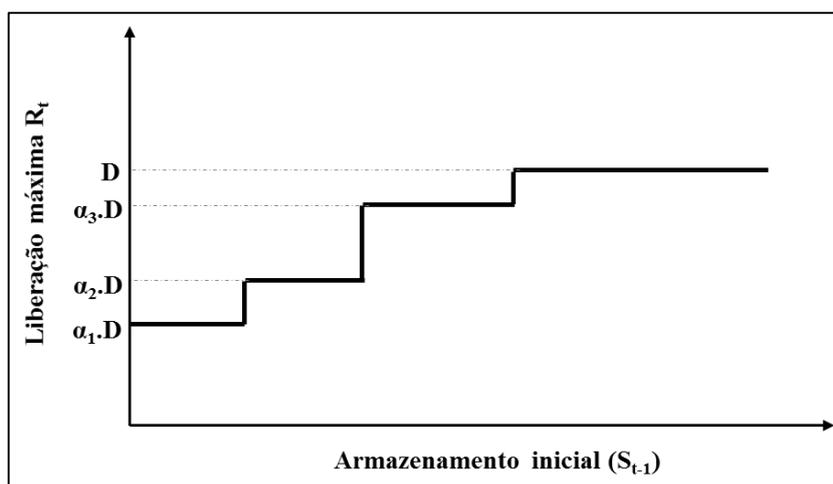
- *Hedging* por zonas: As quantidades de *hedging* são proporções discretas das demandas alvo para diferentes níveis da água em determinadas zonas de armazenamento do reservatório, vide Figura 12 e Figura 13.

Figura 12. Política de *hedging* por zonas (fases discretas).



Fonte: adaptado de Neelakantan e Sasireka (2015).

Figura 13. Política de *hedging* por zonas controlada pelo armazenamento inicial.



Fonte: adaptado de Neelakantan e Sasireka (2015).

A seguir, são apresentados brevemente os trabalhos relacionados com a política de *hedging* desenvolvidos até o momento.

Hashimoto et al. (1982) derivaram políticas operacionais padrão e de *hedging*, utilizando programação dinâmica estocástica para um reservatório com uma demanda única para irrigação. Para tal, estes pesquisadores utilizaram uma sequência de vazões sintética com 20 anos de dados, a qual foi gerada por um modelo Thomas-Fiering, analisaram os critérios confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade para análise do desempenho de sistemas de reservatórios.

Moy et al. (1976) propuseram duas descrições adicionais para o desempenho do reservatório: o déficit máximo a partir da demanda (vulnerabilidade do sistema) e o número

máximo de períodos consecutivos de déficit durante o registro (resiliência do sistema). Quanto maior o déficit máximo, maior a vulnerabilidade, e quanto menor a quantidade máxima de períodos consecutivos apresentando déficit, maior a resiliência do sistema. Os autores desta pesquisa utilizaram a programação linear inteira mista (MILP – *Mixed-Integer Linear Programming*) com objetivos múltiplos para analisar os trade-offs entre confiabilidade, vulnerabilidade e resiliência. Eles encontraram que conforme a confiabilidade ou a resiliência crescem, cresce também a vulnerabilidade a déficits de grandes magnitudes.

Bayazit e Ünal (1990) realizaram diversas simulações de políticas de operação utilizando diferentes fatores de *hedging* (o fator de *hedging* se relaciona com o grau de racionamento). Estes autores objetivaram verificar a variação dos índices de desempenho (confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade – os quais são detalhados no item 2.1.3 do presente trabalho) de acordo com os fatores de *hedging* e a relação entre estes para um reservatório com uma demanda única para irrigação. Para realização destas simulações, utilizaram uma série de vazões sintética com 20 anos de dados.

Shih e ReVelle (1994; 1995) utilizaram como estudo de caso o rio Gunpowder (localizado no estado de Maryland, nos Estados Unidos), para o qual obtiveram uma série de vazões de 80 anos, e partir destas, realizaram suas simulações para os 36 meses da pior seca já registrada.

No artigo publicado em 1994, Shih e ReVelle buscaram determinar os parâmetros da política de *hedging* contínua. Para isso, eles utilizaram dois métodos diferentes para fins de comparação entre os resultados, o primeiro método aplicado foi a utilização do algoritmo de busca polytope e o segundo foi a utilização de um método não linear de programação inteira mista (MINLP – *Mixed-Integer Nonlinear Programming*).

No artigo publicado em 1995, Shih e ReVelle buscaram determinar regras de *hedging* discretas baseadas em zonas, a partir da utilização de um modelo linear de programação inteira mista (MILP – *Mixed-Integer Linear Programming*).

Srinivasan e Philipose (1996; 1998) utilizaram como estudo de caso o Reservatório Hemavathy (localizado na Índia) com uma demanda única para irrigação.

No artigo publicado em 1996, Srinivasan e Philipose objetivaram verificar os efeitos dos parâmetros de disponibilidade hídrica inicial (*starting water availability* - SWA), disponibilidade hídrica final (*ending water availability* - EWA) e o fator de *hedging* (*hedging*

factor - HF) sobre o desempenho do sistema. Para isso, os autores realizaram simulações estocásticas com a utilização de 100 sequências de séries de vazões afluentes sintéticas baseadas na série histórica com 58 anos de dados.

Srinivasan e Philipose (1998) objetivaram verificar os efeitos dos parâmetros de disponibilidade hídrica inicial (*starting water availability* - SWA), disponibilidade hídrica final (*ending water availability* - EWA) e o fator de *hedging* (*hedging factor* - HF) sobre o desempenho do sistema. Para isso, os autores realizaram técnicas de simulação Monte-Carlo utilizando sequências de séries de vazões afluentes sintéticas.

Neelakantan e Pundarikanthan (1999) formularam a regra de *hedging* sem considerar a vazão afluente no período corrente, sendo a liberação decidida com base apenas no armazenamento inicial. Eles justificaram esta formulação diferenciada baseados no argumento de que é difícil para um operador e/ou gestor de reservatório prever qual será a vazão afluente no período e decidir a liberação de água baseado em uma previsão de vazão afluente – critério este estabelecido para a definição das regras de *hedging* em trabalhos anteriores a este.

Para isso, Neelakantan e Pundarikanthan (1999) utilizaram um modelo de simulação para operação de um sistema de reservatórios projetado para abastecimento de água potável como submodelo para um modelo de programação não-linear sem restrições para otimização do gerenciamento das variáveis de decisão. No processo de otimização, o gerenciamento das variáveis de decisão foi passado do modelo de otimização para o de simulação para obtenção do valor da função objetivo; o valor encontrado foi transferido de volta para o modelo de otimização e os valores das variáveis de decisão foram ajustados baseados na melhora do valor da função objetivo. Este processo foi repetido até que não fosse possível observar alguma melhora no valor da função objetivo.

Cancelliere et al. (1998) avaliaram a susceptibilidade de um sistema a condições de seca. Para tal, estes pesquisadores realizaram simulações da relação entre a seca hidrológica e o desempenho de um único reservatório, através da aplicação de uma série de dados de vazão afluente sintética que compreendesse 200 situações de seca. Para realizar as simulações foram consideradas as políticas de operação SOP e de *hedging* e foi verificado que quando foram aplicadas políticas de *hedging*, os impactos das secas foram reduzidos.

Tu et al. (2003) desenvolveram um modelo linear de programação inteira mista (MILP – *Mixed-Integer Linear Programming*) para o qual foram consideradas políticas de

operação baseadas na regra de decisão linear (LDR) e na regra de *hedging*; aplicadas para um sistema de múltiplos reservatórios localizados em Taiwan, destinados para abastecimento urbano, industrial, irrigação, controle de cheias e geração de energia elétrica. Nesta pesquisa foi utilizada para o modelo uma sequência de 36 períodos de 10 dias, correspondentes ao ano mais seco.

Shiau (2003) utilizou como objeto de estudo o reservatório Shihmen (localizado em Taiwan), o qual tem como objetivo o abastecimento urbano e agrícola. Este autor elaborou um índice de fornecimento do reservatório, simbolizado pela letra grega phi (ϕ), o qual utilizou para determinar as condições de gatilho para iniciar e parar a aplicação do *hedging* de múltiplas fases. Para o desenvolvimento do trabalho, o autor utilizou uma série sintética de vazões afluentes com dez mil anos de dados obtida através do modelo de desagregação condensado de Lane.

Draper e Lund (2004) examinaram as regras de *hedging* analiticamente, derivando elas dos benefícios de se fazer a liberação no presente comparando com os valores esperados para os usos futuros, através da transferência de armazenamento no reservatório. Eles concluíram que a política de *hedging* ótima para operação de reservatórios de suprimento de água depende de um balanço entre o benefício de liberação da água e o valor de armazenamento de água para o futuro e que políticas de *hedging* ótimas podem ser derivadas para um par benefício de liberação e armazenamento; fornecendo uma visão analítica das regras e operações de *hedging*.

Além disso, Draper e Lund (2004) observaram que uma política de *hedging* de dois pontos pode ser próxima do ótimo em muitos casos; de modo que não é recomendável desviar-se muito da política de *hedging* de dois pontos.

Shiau e Lee (2005) utilizaram como objeto de estudo o reservatório Shihmen (localizado em Taiwan), considerando uma única demanda. Eles visaram a minimização da escassez mensal e também a taxa de escassez. Para isso, utilizaram a programação de compromisso, considerando duas regras de *hedging*: de dois pontos e conforme a escassez potencial em um determinado período futuro (*lead-time*).

Peixoto (2006) objetivou a construção de uma rotina computacional destinada à derivação de políticas operacionais de sistemas de recursos hídricos; a partir da utilização de um simulador desenvolvido em linguagem de programação C++, e a biblioteca de distribuição livre GALib C++. Desta forma desenvolveu um modelo matemático de otimização baseado

em algoritmos genéticos para derivação de estratégias operacionais de proteção contra déficits de suprimento para um sistema de reservatórios Cantareira, localizado no Estado de São Paulo.

Tu et al. (2008) objetivaram conceber novas regras de *hedging* para um sistema de múltiplos reservatórios. Para tal, transformaram um modelo não linear de programação inteira mista (MINLP) em um modelo de programação quadrática inteira mista. Os autores deste artigo utilizaram como objeto de estudo um sistema de múltiplos reservatórios localizado no sul de Taiwan para demonstrar a utilidade do modelo. Eles encontraram que as novas regras ótimas de *hedging* melhoraram a eficiência da operação dos reservatórios.

You e Cai (2008a) expandiram a análise teórica das políticas de *hedging* apresentadas por Draper e Lund (2004) e desenvolveram um modelo conceitual de dois períodos para a operação do reservatório com *hedging*, levando em consideração as incertezas das vazões afluentes ao reservatório de forma explícita. Estes autores apresentaram uma análise estendida das propriedades do modelo e dos fatores influentes, como uma função de utilidade geral, abordando os valores gatilho de disponibilidade hídrica que sinalizam o início e o fim da aplicação da política de *hedging*, como o *hedging* varia de acordo com a demanda, a incerteza das vazões afluentes, e as perdas por evaporação. Nesta pesquisa, o *hedging* foi explorado para abordar os problemas de operação de reservatórios focando em minimizar as perdas ou os déficits no suprimento de água durante períodos secos.

You e Cai (2008b) apresentaram um método que deriva a regra de *hedging* a partir da análise teórica desenvolvida por You e Cai (2008a) com um modelo hidrológico de Markov explícito de dois períodos – uma forma particular de função utilidade não linear – e uma dada distribuição probabilística de vazões afluentes. Este procedimento visa incorporar a derivação da regra de *hedging* baseada no princípio da utilidade marginal na simulação de operação do reservatório. O método de simulação utilizado por estes pesquisadores visa evitar o problema de falta de precisão causado por tentativa e erro em modelos de simulação tradicionais e também evitar a dificuldade computacional existente em algumas abordagens de otimização, chamada “maldição da dimensionalidade”.

You e Cai (2008c) introduziram os conceitos de horizonte de decisão (DH: *decision horizon*) e horizonte de previsão (FH: *forecast horizon*), considerando a operação estocástica do reservatório sob a aplicação do *hedging*. O horizonte de decisão é definido como sendo os primeiros períodos em que as decisões não são afetadas por dados previstos para além de

um certo período, definido como o horizonte de previsão. Estes autores derivaram uma condição local necessária para encontrar o horizonte de previsão para um dado horizonte de decisão. Eles afirmam que quanto maior for o horizonte de previsão, mais incertas e menos confiáveis serão as informações envolvidas.

A pesquisa de You e Cai (2008c) objetivou determinar o horizonte de previsão para um dado horizonte de decisão para problemas de operação dinâmica de reservatórios, por meio de análises teóricas e matemáticas. Foram utilizadas análises de magnitude e modelagem numérica para identificar o impacto de vários fatores, como grau de estresse hídrico (diferença entre disponibilidade hídrica e demanda), o tamanho do reservatório, incerteza das vazões afluentes, taxa de evaporação e taxa de retirada. Neste trabalho foram utilizados três tipos de séries de vazões afluentes: estacionário, não estacionário com sazonalidade e aleatório (randômico).

Os resultados obtidos por You e Cai (2008c) mostraram que as características das vazões afluentes e da capacidade do reservatório tem um impacto maior no horizonte de previsão quando o estresse hídrico é moderado; e que “reservatórios com volumes úteis maiores e componentes determinísticos de afluências, como a sazonalidade, requerem um horizonte de previsão mais longo” (tradução nossa³). Além disso, foi constatado que fatores econômicos tem impactos fortes quando o estresse hídrico é elevado.

Shiau (2009) analisou a aplicação de políticas de *hedging* para a operação do reservatório Nanhua (localizado no sul de Taiwan). Para encontrar a solução para o problema de operação de reservatório com multiobjectivos, foi utilizado um algoritmo genético de multiobjectivos. Os parâmetros adotados para a definição da regra de salvaguarda foram a disponibilidade hídrica inicial (ponto em que se inicia o racionamento), a disponibilidade hídrica final (ponto em que o racionamento deixa de ser aplicado) e o fator de *hedging* (grau de racionamento aplicado).

Eum et al. (2011) utilizaram como objeto de estudo a bacia hidrográfica do rio Geum (localizado na Coreia do Sul). Foram desenvolvidos procedimentos para calcular o corte ótimo na liberação de água durante períodos de seca, utilizando uma função de valor futuro derivada com um modelo de programação dinâmica de amostragem estocástica.

³ Texto original: “larger reservoir capacity and the deterministic component of inflow such as seasonality require a longer FH”. (YOU; CAI, 2008c).

Em Eum et al. (2011), os gatilhos para alternar entre a política normal e a política de emergência (EOP – *emergency operating policy*) foram baseados no armazenamento inicial do reservatório, representando uma confiabilidade de abastecimento de água de 95%, e índice de seca agregada que emprega 6 meses de precipitação acumulada e 4 meses de fluxo acumulado. Os resultados demonstraram que a abordagem da política de emergência reduz a escassez máxima de água; é mais válida sua aplicação quando o armazenamento inicial do período analisado é baixo; e é superior em relação a outras abordagens quando considera-se explicitamente as incertezas das previsões.

Shiau (2011) derivou analiticamente o *hedging* ótimo para um reservatório, considerando o equilíbrio entre o benefício da liberação e o valor de armazenamento de água para o futuro. A função objetivo foi definida como sendo o peso da soma das funções de perda, tanto para a liberação presente como para o armazenamento para o futuro. Este *hedging* ótimo analítico foi generalizado para representar *hedging* de um ponto e de dois pontos. Nesta pesquisa, o reservatório Shihmen (localizado no norte de Taiwan) foi utilizado como objeto de estudo.

Zhao et al. (2011) discutiram as condições ótimas para a política de operação padrão de reservatórios (SOP) e para a política de *hedging* para um problema de operação de reservatórios de dois estágios. Para tal, eles utilizaram uma consistente estrutura teórica para um problema de operação de dois estágios (isto é, determinando a liberação tanto no período corrente quanto nos períodos futuros). Foram analisados os efeitos de três restrições típicas, como o balanço de massa, liberações não negativas, e restrições de armazenamento sob condições certas e incertas.

O objeto de estudo escolhido por Zhao et al. (2011) para aplicação do algoritmo desenvolvido para resolver o modelo numérico foi o reservatório Miyun (localizado na China). Eles concluíram que um alto grau de incerteza no futuro implica que a água deve ser reservada como medida de segurança para os usos futuros e, sendo assim, a política de *hedging* é a mais favorável.

Dariane e Karami (2012) estudaram diferentes políticas de *hedging* e investigaram a eficiência de alguns algoritmos evolutivos para a resolução de questões de políticas operacionais de reservatórios. Estes pesquisadores empregaram os modelos propostos para a utilização integrada dos recursos hídricos em Tehran, no Irã, e os avaliaram e compararam para determinar quais os modelos mais compatíveis. Os dois métodos estudados foram as

políticas de *hedging* discreta e de dois pontos; e eles concluíram que a primeira faz menos cortes e tem uma performance melhor do que a regra de dois pontos.

Neelakantan e Sasireka (2013) afirmaram que as políticas de *hedging* são comumente utilizadas para operação de reservatórios que tem como objetivo o abastecimento urbano e agrícola, mas que a aplicação destas políticas para a operação de reservatórios destinados à geração de energia hidrelétrica é complexa. Sendo assim, estes autores propuseram novas políticas padrão de operação e de *hedging* para a operação de reservatórios de hidrelétricas e adotaram o reservatório de Indira Sagar (localizado na Índia) como objeto de estudo.

Neelakantan e Sasireka (2015) realizaram uma revisão abrangente dos diferentes tipos de modelos de *hedging* e sugeriram algumas direções para pesquisas futuras nessa área, como, por exemplo, a combinação dos índices de desempenho (confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade), de modo a promover uma avaliação mais completa das políticas de *hedging* e a definição dos gatilhos para iniciar e parar a aplicação das regras de *hedging* com base em previsões obtidas a partir de índices de seca ou de índices climáticos.

3.1.3 Índices de desempenho

Conforme sugerido por Neelakantan e Sasireka (2015), para avaliar o desempenho das políticas de operação de reservatórios simuladas no presente trabalho, foram utilizados dois dos três índices de desempenho sugeridos por Hashimoto et al. (1982), confiabilidade e vulnerabilidade, uma vez que as políticas de *hedging* visam encontrar o equilíbrio entre estes dois critérios. Segundo Hashimoto et al. (1982) não é possível que um sistema tenha, ao mesmo tempo, o máximo de confiabilidade e o mínimo de vulnerabilidade; a alta confiabilidade será acompanhada pela alta vulnerabilidade do sistema.

Os três critérios discutidos por Hashimoto et al. (1982) para avaliação e seleção de alternativas de projetos e políticas de operação de projetos de recursos hídricos foram: confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade.

No presente trabalho a confiabilidade é definida como sendo o oposto da probabilidade de falha (ou o oposto do risco), ou seja, a confiabilidade é igual a um menos a probabilidade de falha. É importante ressaltar que a confiabilidade não se refere nem a magnitude da falha e nem a suas possíveis consequências.

A resiliência descreve a provável rapidez com que o sistema irá se recuperar de uma falha uma vez que ela tenha ocorrido; e a vulnerabilidade refere-se à provável

magnitude de uma falha, caso ela ocorra. Sendo assim, mesmo que o sistema tenha alta confiabilidade, com baixa probabilidade de falhas, deve-se atentar às possíveis consequências das falhas (HASHIMOTO et al., 1982).

Ainda, cabe ressaltar que a partir de certo ponto, vale mais a pena investir na redução das consequências das falhas para que sejam menos severas e mais aceitáveis do que tentar eliminar completamente a possibilidade de ocorrência de falhas; e além disso, os esforços em maximizar a eficiência e a confiabilidade do sistema podem, na verdade, aumentar a vulnerabilidade do sistema para uma falha muito severa, em termos de magnitude (HASHIMOTO et al., 1982).

Hashimoto et al. (1982) afirmaram que as políticas de operação ótimas entregam a totalidade da demanda alvo, sempre que possível, porém podem falhar completamente, de forma a não entregar qualquer quantidade de água, quando uma falha mais severa já é considerada inevitável. Para evitar uma falha tão severa, utilizam-se políticas de operação de *hedging*, as quais por vezes fornecem apenas uma parte da demanda, mesmo quando seria possível atender a sua totalidade ou uma parte maior dela.

Sendo assim, com a aplicação do *hedging*, a confiabilidade do sistema diminuirá, por conta de que essa política aceita que hajam pequenos déficits no abastecimento para reduzir as perdas decorrentes de possíveis falhas futuras. Segundo Hashimoto et al. (1982), um sistema com alta confiabilidade terá também alta vulnerabilidade, de forma que não é possível que se tenha, ao mesmo tempo, o máximo de confiabilidade e o mínimo de vulnerabilidade.

3.2 VALOR ECONÔMICO DA ÁGUA

A Conferência Internacional da Água e do Ambiente (ICWE – *International Conference on Water and the Environment*), ocorrida em 1992 na cidade de Dublin, ressaltou a necessidade de se considerar a água como um bem dotado de valor econômico em todos os seus usos. Segundo a Declaração de Dublin, a falta de reconhecimento do valor econômico da água levou ao seu desperdício e a danos ambientais decorrentes do seu uso inadequado. Este documento também explicitou que a gestão da água é uma importante forma de atingir a eficiência e equidade no seu uso e de promover a sua conservação e proteção.

A Conferência realizada em Dublin (ICWE, 1992) ressaltou que são necessárias medidas para reverter as tendências atuais de consumo excessivo, poluição e as crescentes ameaças de secas e inundações. O Relatório da Conferência definiu algumas recomendações para aplicação a nível local, nacional e internacional, baseadas em quatro princípios fundamentais da Gestão

Integrada dos Recursos Hídricos, definida pela *Global Water Partnership* (GWP) como "um processo que promove a gestão e desenvolvimento coordenado de água, da terra e dos recursos relacionados, a fim de maximizar o bem-estar social e económico de modo equitativo, sem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas vitais", dentre os quais destaca-se o quarto princípio.

O quarto princípio da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos estabelece que a água possui valor econômico em todos os seus usos e deve ser reconhecida como um bem econômico. Dentro deste princípio, é vital reconhecer primeiramente o direito básico de que todos os seres humanos tenham acesso a água potável e saneamento a um preço acessível. O não reconhecimento do valor econômico da água no passado levou ao desperdício e a usos ambientalmente nocivos do recurso. A gestão da água como um bem econômico é uma importante forma obter-se uma utilização eficiente e equitativa, assim como incentivar a conservação e proteção dos recursos hídricos.

No Brasil, a Lei Federal nº 9.433 de 1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, a qual representa um novo marco institucional no país, pois incorpora princípios, normas e padrões de gestão de água já aceitos e praticados em muitos países. Esta lei está baseada nos seguintes princípios:

- I - a água é um bem de domínio público;
- II - **a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;**
- III - em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV - a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V - a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI - a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. (BRASIL. Lei nº 9.433, 1997, art. 1º, grifo nosso).

Segundo Souza (2010), dentre os instrumentos da Política Nacional dos Recursos Hídricos, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos tem como objetivos: "reconhecer a água como um bem econômico e dar aos usuários uma indicação do seu real valor; incentivar a racionalidade do uso da água; e obter recursos para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos".

A respeito do valor da água, Rogers et al. (1997) consideraram que este seja dividido entre o valor econômico e o valor intrínseco da água, sendo o primeiro dividido em quatro categorias: o valor da água para os usuários (valor marginal ou disponibilidade a pagar); benefícios líquidos dos fluxos de retorno (reconhece o papel vital desempenhado pelos fluxos de retorno em vários sistemas hidrológicos, como a recarga dos aquíferos); benefícios líquidos oriundos de usos indiretos (como, por exemplo, os benefícios resultantes dos sistemas que fornecem água para irrigação e para pecuária e também para os usos domésticos, no que diz respeito ao aumento da renda e da saúde); e, por fim, os benefícios obtidos pelo cumprimento de objetivos sociais (como a redução da pobreza, a geração de empregos e a segurança alimentar).

Young (2004) distinguiu o valor econômico da água em quatro diferentes classes, e reconheceu outros possíveis valores, como o valor intrínseco, o valor referente à preservação do ecossistema e o valor sociocultural. A primeira classe é referente aos benefícios de commodities (para uso doméstico e também como insumo de atividades produtivas, como a agricultura irrigada, comércio e indústrias). A segunda classe diz respeito aos benefícios da assimilação de resíduos e efluentes, os quais são relacionados com a função de dissipação, diluição e, em alguns casos, degradação que a água exerce sobre os resíduos e efluentes. A terceira classe se refere aos valores estéticos, recreativos e de manutenção da biota aquática e da vida selvagem.

Por fim, a quarta classe definida por Young (2004) é referente aos usos passivos (ou, do inglês, valor de não-uso - *nonuse values*). No caso dos usos passivos, as pessoas estão dispostas a pagar por serviços ambientais que não irão utilizar diretamente, ou seja, estes benefícios advêm do conhecimento da existência de um determinado bem, embora o indivíduo possa nunca usufruir deste bem (como, por exemplo, realizar um investimento para preservação de uma espécie de peixe ameaçada de extinção). Segundo Young (2004), muitos pesquisadores defendem que este tipo de benefício deve ser realocado para os benefícios ativos, para que assim seja possível medir com maior precisão a soma dos valores ambientais.

Em relação ao valor da água para os usuários, quando a água puder ser considerada como uma variável de entrada na produção (usuários industriais e comerciais), o valor da água pode ser medido por meio do aumento na produção decorrente do uso da água. No caso de usuários residenciais, o valor da água pode ser obtido por meio da disponibilidade a pagar (TILMANT et al, 2008).

Segundo Hanemann (2005), até a década de 70 tinha-se a ideia de que o valor econômico de um bem era mensurado através de seu preço; no entanto, se assim fosse, só teriam valor econômico os bens transacionados no mercado. No entanto, valor econômico e preço são atributos diferentes; de modo que o preço não necessariamente mede o valor econômico de um bem, e também, um item que não possua preço de mercado pode possuir um valor econômico positivo.

Hanemann (2005) explicitou que o conceito moderno de valor considera o valor de uso como a medida de referência; e demonstrou que este conceito já havia há muito sido desenvolvido por Dupuit (1844) e Marshall (1879). Dupuit definiu a utilidade de um bem como o valor máximo que cada consumidor estaria disposto a pagar para adquiri-lo; e Marshall definiu como medida econômica da satisfação a quantia que a pessoa estaria disposta a pagar para não ficar sem um determinado recurso. Nas palavras de Hanemann, as definições propostas por Dupuit e por Marshall:

“realçam as diferenças existentes entre a demanda e a oferta: a medida do valor é o que o item vale para o indivíduo, e não o que ele custa. Sendo assim, um item pode ser barato para produzir, no sentido de que o seu custo total é baixo, mas de alto valor para o proprietário, de modo que o valor total para ele é grande, e vice-versa.” (HANEMANN, 2005, tradução nossa⁴).

A quantidade marginal mede a variação no valor total para uma determinada variação unitária na quantidade. Se o consumidor for livre para variar a quantidade que irá comprar de um bem, ele escolherá aquela quantidade que igualar o preço ao seu valor marginal. Desta forma, o preço de mercado será similar ao valor marginal da última unidade consumida (DUPUIT, 1844 *apud* HANEMANN, 2005).

Para Marshall (1879 *apud* HANEMANN, 2005), existe um limite para cada necessidade, determinado pela utilidade marginal decrescente, tal que, no limite, a utilidade marginal se iguala ao preço. Dado que quanto mais quantidade de um bem possuímos, menos valor atribuímos para quantidades adicionais do mesmo (utilidade marginal decrescente), se o valor marginal da última unidade consumida iguala o preço, então a utilidade marginal associada à unidade inframarginal será maior do que o preço de mercado.

4 Texto original: “These definitions highlight the distinction between demand and supply: the measure of value is what the item is worth to the individual, not what it costs. Thus, an item can be cheap to produce, in the sense that its total cost is low, but highly valuable to the owner, in that its total value to him is large, or conversely.” (HANEMANN, 2005).

Segundo Tilmant et al. (2008), o valor marginal da água dá a contribuição de uma unidade adicional de água para qualquer objetivo público ou privado que esteja sendo analisado. Avaliar o valor marginal da água não é uma tarefa fácil, pois alguns usos da água podem gerar externalidades, e os mercados frequentemente não são aplicáveis.

De acordo com Tilmant et al. (2008), o valor marginal da água pode ser utilizado no gerenciamento de bacias hidrográficas para sinalizar a escassez da água, para priorizar zonas onde devem ser implementadas medidas de conservação do solo e da água e para que a produtividade da água seja aumentada por meio da alocação da água para usos mais produtivos. Estes autores ressaltaram que as curvas de demanda e os valores marginais de água devem ser usados para subsidiar políticas de intervenção que impeçam a utilização excessiva dos recursos hídricos e assegurem sua qualidade.

3.2.1 Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar)

Em situações de escassez hídrica o valor marginal da água é maior, e a curva de benefícios marginais representa o comportamento dos usuários frente a estas circunstâncias, a qual é conhecida também como curva de disponibilidade a pagar.

Tendo em vista que o presente trabalho objetiva a minimização do custo da escassez para a operação do Sistema Cantareira, e dado que a curva que descreve o custo da escassez é obtida a partir da integração da curva de benefícios marginais, foi necessário estimar esta curva, para que fosse possível calcular o custo da escassez associado com as regras de operação de reservatórios analisadas.

O Método *Point Expansion*, sugerido por Griffin (2006), é o método mais simples para estimar a curva de disponibilidade a pagar, pelo menos aproximadamente. A compreensão deste método está vinculada ao conceito de elasticidade. A elasticidade é uma medida adimensional amplamente utilizada pelos economistas para caracterizar a resposta do sistema para condições de mudança. Desta forma, às funções de demanda é atribuída uma determinada elasticidade-preço ou elasticidade-renda, ou qualquer outra variável independente que seja utilizada como argumento na função de demanda.

Conforme Pindyck e Rubinfeld (1999), a elasticidade é um termo econômico usado para expressar a sensibilidade de uma variável em relação à outra. A elasticidade-preço da demanda mede a sensibilidade da quantidade demandada em resposta a alterações nos

preços. A elasticidade evidencia qual a variação percentual na demanda de uma mercadoria quando da elevação de 1% no seu preço.

Para a elasticidade-preço da demanda, o valor atribuído é geralmente negativo, por conta de que o aumento dos preços reduz as quantidades demandadas, estabelecendo uma relação inversa entre as variáveis.

Segundo Viceconti e Neves (2003), três fatores que influenciam a elasticidade preço da demanda: o grau de utilidade do produto para o consumidor; a quantidade de substitutos que o produto possui; e o peso no orçamento do consumidor.

Em relação ao grau de utilidade do produto para o consumidor, quanto mais imprescindível o produto for, menos sensíveis às oscilações nos preços serão as quantidades demandadas, evidenciando uma demanda inelástica para produtos de extrema necessidade.

No que diz respeito à quantidade de substitutos que o bem possui, se houverem substitutos e o preço subir, os consumidores tendem a substituir bem por outro mais barato, e caso não haja substitutos, a demanda apresenta pouca sensibilidade em relação ao aumento nos preços.

No que concerne ao peso no orçamento do consumidor causado pelos preços dos produtos quanto menor for o peso de um produto no orçamento do consumidor, menos elástica será sua demanda e vice-versa.

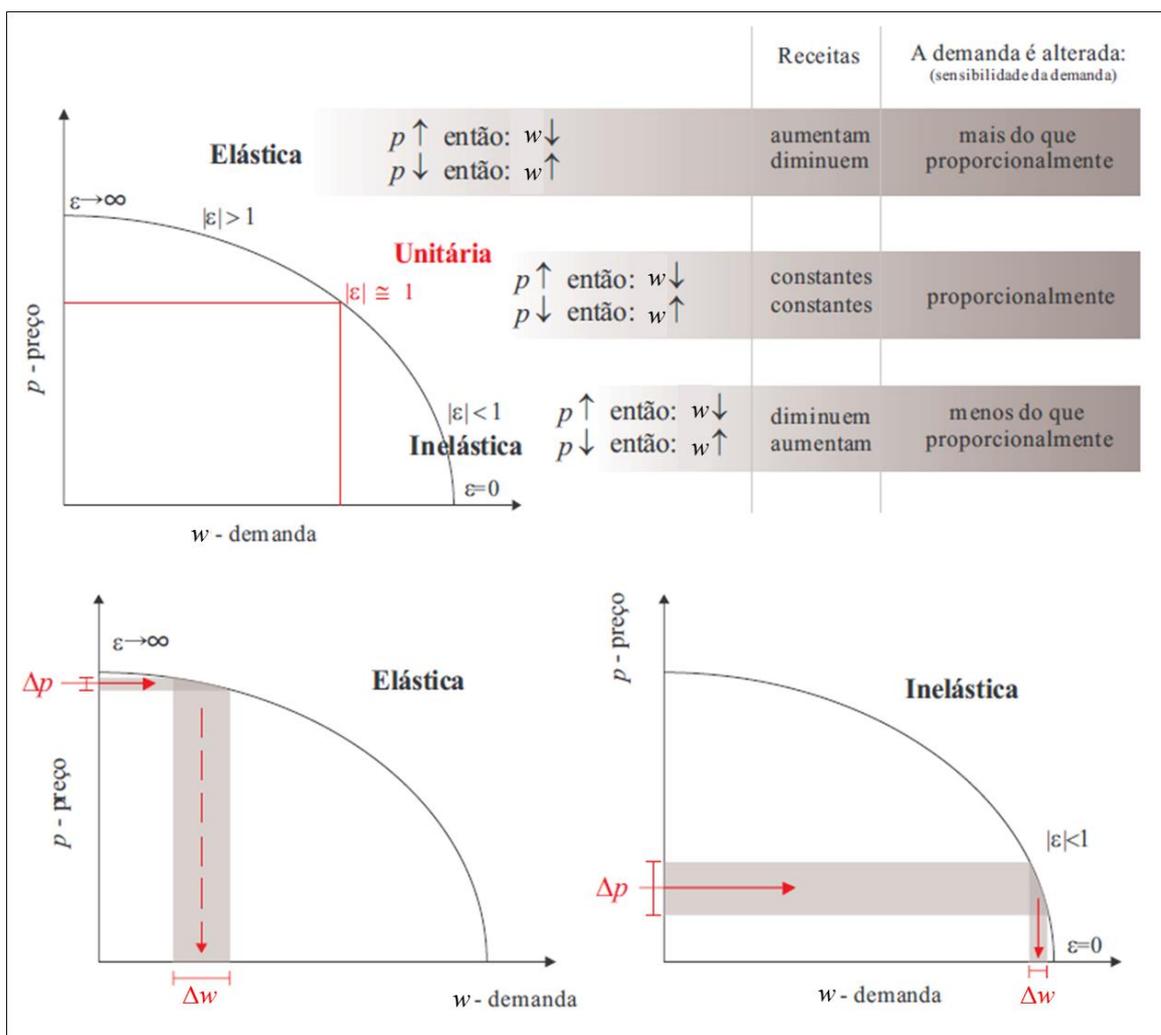
As curvas de disponibilidade a pagar pela água, geralmente são inelásticas em relação ao preço, isto é, a elasticidade varia de menos um até zero ($-1 < \epsilon < 0$). Isto significa que a variação de 1% no preço da água induz uma variação menor do que 1% na demanda por água.

Caso o valor da elasticidade-preço da demanda de um bem for menor que menos um ($\epsilon < -1$), a demanda é dita elástica em relação ao seu preço. Então se uma função de demanda possui “maior” elasticidade-preço do que outra, isto significa que a elasticidade é maior em valores absolutos.

Por fim, se a elasticidade preço da demanda de um determinado bem for igual a menos um ($\epsilon = -1$), sua demanda apresenta elasticidade unitária em relação ao seu preço.

A Figura 14 a seguir apresenta os possíveis valores que a elasticidade-preço da demanda pode assumir e como se comportam as curvas de demanda para os casos de a função ser elástica ou inelástica.

Figura 14. Elasticidade-preço da demanda.



Fonte: adaptado de Medeiros e Ribeiro (2006).

O método de obtenção da curva de disponibilidade a pagar descrito a seguir foi proposto por Griffin (2006), e é conhecido como *Point Expansion*, ou método da expansão do ponto.

A elasticidade-preço da demanda ϵ é definida como a alteração que irá ocorrer na quantidade demandada (w) para uma alteração no preço (p) (ambas em termos percentuais), conforme apresentado na Equação 4 a seguir.

$$\epsilon = \frac{\frac{\Delta w}{w}}{\frac{\Delta p}{p}} = \frac{\Delta w}{\Delta p} \cdot \frac{p}{w} \quad \text{Equação 4}$$

Haja vista que a demanda diminui conforme o preço aumenta, ϵ é negativo. Valores de elasticidade geralmente estão disponíveis para a análise de recursos hídricos, mesmo que

seja necessário utilizar as estimativas para estudos de outras regiões. A Tabela 2 apresentada na sequência explicita alguns valores de elasticidade-preço da demanda da água existentes na literatura para abastecimento urbano e residencial.

Tabela 2. Valores de elasticidade-preço da demanda da água para abastecimento urbano e residencial.

Elasticidade-preço da demanda (ϵ)	Abrangência	Autor
-0,66 a -1,24	Kansas/EUA	Gottlieb (1963)*
-0,23 (I)	Inverno em diversas regiões metropolitanas dos EUA	Howe e Linaweaver (1967)*
-0,86 (V)	Verão no leste dos EUA	Howe e Linaweaver (1967)*
-0,52 (V)	Verão no oeste dos EUA	Howe e Linaweaver (1967)*
-0,05 a -0,40	Massachussets/EUA	Turnovsky (1969)*
-0,02 a -0,82	Illinois/EUA	Wong (1972)*
-0,41 e -0,62	Tucson/EUA	Young (1973)*
-0,51 e -0,62	Miami/EUA	Gibbs (1978)*
-0,30 (I)	North Caroline/EUA	Danielson (1978)*
-1,38 (V)	North Caroline/EUA	Danielson (1978)*
-0,30 a -0,69	EUA	Foster e Beattie (1979)*
-0,27 e -0,49 (I)	Tucson/EUA	Agthe e Billings (1980)*
-0,67 e -0,70 (V)	Tucson/EUA	Agthe e Billings (1980)*
-0,06 (I)	Inverno em diversas regiões metropolitanas dos EUA	Howe (1982)*
-0,57 (V)	Verão no leste dos EUA	Howe (1982)*
-0,43 (V)	Verão no oeste dos EUA	Howe (1982)*
-0,14 a -0,44	Denver/EUA	Jones e Morris (1984)*
-0,03 a -0,68	Honolulu/EUA	Moncur (1987)*
-0,56 e -0,72	Tucson/EUA	Billings (1990)*
-0,11 e -0,26	Columbus/EUA	Schneider e Whitlach (1991)*
-0,02 a -0,60	EUA	Nieswiadomy (1992)*
-1,53 a -1,629	Texas/EUA	Hewitt e Hanemann (1995)
-0,51	Média obtida por meta-análise de 124 valores obtidos em 24 estudos.	Espey et al. (1997)
-0,14 a -1,24	Califórnia/EUA	Pint (1999)
-0,41	Média obtida por meta-análise de 314 valores obtidos em 64 estudos.	Dalhuisen et al. (2003)
-0,661 a -1,155	Phoenix - Arizona/EUA	Yoo et al. (2014)

Elasticidade-preço da demanda (ϵ)	Abrangência	Autor
-0,37	Jakarta/ Indonésia	Bhatia et al. (1995)*
-0,29 a -0,33	Bogor/ Indonésia	Bhatia et al. (1995)*
-0,37 a -0,44	Costa Rica	Bhatia et al. (1995)*
-0,38	México	Bhatia et al. (1995)*
-0,60	Brasil	Bhatia et al. (1995)*
-0,24	Sanepar (Geral)	Andrade et al. (1995)
-0,62	Sanepar (< 2 SM)	Andrade et al. (1995)
-0,17	Sanepar (2 < SM < 10)	Andrade et al. (1995)
-0,22	Sanepar (> 10 SM)	Andrade et al. (1995)
-0,5502	Nordeste brasileiro	BNB (1997)
-0,46	Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba	Pereira et al. (1999)
-0,32	Bacia Hidrográfica do Rio Pardo	Alvim (2005)

* apud Ribeiro et al. (1999).

Segundo Ribeiro et al. (1999), os valores mais altos de elasticidade apresentados são referentes ao período do verão onde se praticam usos externos e menos nobres como rega de jardins e lavagem de carros. “O valor da elasticidade para o uso residencial depende, entre outros fatores, da técnica de estimativa, da estação do ano, da renda do usuário, da estrutura de preço, do padrão de uso da água” (Ribeiro et al., 1999).

Para utilizar o método Point Expansion para estimar a demanda, é necessário que se tenha um valor de elasticidade da demanda estimado obtido externamente e um ponto conhecido da função de demanda. Este ponto é definido a partir de dados de tarifa de água cobrada (R\$/m³) e do consumo total de água pela população (m³). Além disso, deve-se assumir que a função de demanda tenha um determinado comportamento, podendo possuir declividade constante ou elasticidade-preço constante (GRIFFIN, 2006).

Para o caso em que é assumido que a declividade da função de demanda *versus* preço é constante, a curva de disponibilidade a pagar se comporta de forma linear e é obtida da seguinte forma:

$$w = \alpha \cdot p + \beta$$

Equação 5

Onde α e β são definidos por:

$$\alpha = \frac{\varepsilon \cdot W}{P} \quad \text{Equação 6}$$

$$\beta = W - (\alpha \cdot P) \quad \text{Equação 7}$$

Desta forma:

$$w = W \cdot \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{P} \cdot p\right) \quad \text{Equação 8}$$

Onde (W, P) é o ponto conhecido e (w, p) é o ponto da curva encontrado.

Para o caso em que é assumido que a elasticidade-preço da função de demanda *versus* preço é constante, a curva de disponibilidade a pagar é obtida da seguinte forma:

$$\frac{dw}{w} = \varepsilon \frac{dp}{p} \quad \text{Equação 9}$$

Integrando os dois lados da Equação 9, obtém-se:

$$\ln w = \varepsilon \cdot \ln p + \ln k \quad \text{Equação 10}$$

$$w = k \cdot p^\varepsilon \quad \text{Equação 11}$$

Onde k é uma constante arbitrária definida por:

$$k = \frac{W}{P^\varepsilon} \quad \text{Equação 12}$$

Desta forma, para o caso de a elasticidade-preço da demanda ser constante, a curva de disponibilidade a pagar é definida segundo a Equação 12 a seguir.

$$w = \frac{W}{P^\varepsilon} \cdot p^\varepsilon \quad \text{Equação 13}$$

Onde (W, P) é o ponto conhecido e (w, p) é o ponto da curva encontrado.

Desta forma, a partir de um ponto conhecido de consumo total de água (em metros cúbicos) e o respectivo preço cobrado por cada metro cúbico, é definido o ponto de expansão da curva, onde W é a quantidade de água consumida (em m³), e P é a tarifa cobrada pela água (em R\$/m³). Substitui-se os referidos valores de W e P na Equação 13 e modifica-se a variável “p” de forma a encontrar o consumo de água vinculado com cada tarifa, para uma dada elasticidade-preço da demanda (ε).

Ressalta-se que o intervalo de análise da curva de disponibilidade a pagar deve ser próximo do ponto utilizado para a geração desta pelo método *Point Expansion*, para que não

haja discrepâncias muito grandes. A aplicação da curva em análises envolvendo extrapolações muito distantes do ponto original podem levar a erros significativos.

3.2.2 Custo da escassez

A equação que descreve o custo da escassez é obtida a partir da integração da curva de disponibilidade a pagar, haja vista que o custo da escassez é definido como sendo a área sob a curva de demanda *versus* preço. Deste modo, é preciso inferir qual será o ponto em que a demanda seja completamente atendida, de modo que o benefício marginal seja próximo a zero. Desta forma, define-se que o custo da escassez para este ponto é igual a zero, e a partir daí calcula-se o custo da escassez para os demais valores de quantidade de água entregue por meio da integração.

Griffin (2006) explica esta relação entre a curva de disponibilidade a pagar e a curva de custo da escassez, conforme será descrito na sequência.

As curvas de benefício marginal da água ou de disponibilidade a pagar, são por vezes chamadas de curvas de demanda. Como destacado por Griffin (2006), o termo “curva de demanda” não é sempre correto uma vez que pressupõe a existência de um mercado para o bem, o que normalmente não ocorre para o caso da água bruta. Por conta de o adjetivo “marginal” significar “derivado de”, a presença da palavra marginal imediatamente indica qual informação pode ser recuperada integrando-se a função matematicamente. Desta forma, ao realizar a integração da curva de benefício marginal, encontra-se o benefício total.

Para o caso em que é assumido que a declividade da função de demanda *versus* preço é constante, e que o comportamento da curva de benefício marginal é linear, a integral se dá conforme a Equação 14.

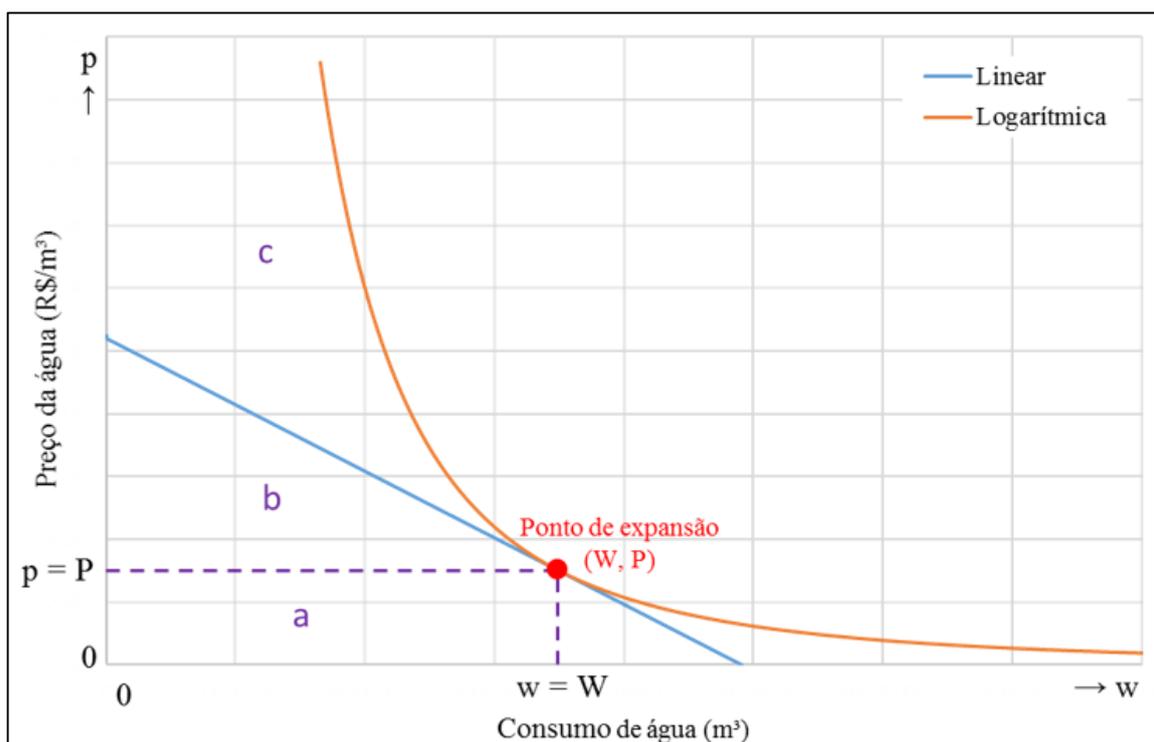
$$\text{Área } a + b = \int_0^W \left[\left(\frac{P}{W \cdot \varepsilon} \cdot w \right) + \left(P - \frac{P}{\varepsilon} \right) \right] dw \quad \text{Equação 14}$$

Para o caso em que é assumido que a elasticidade-preço da função de demanda *versus* preço é constante, a integral se dá conforme a Equação 15.

$$\text{Área } a + b + c = \int_0^W \left(k \frac{-1}{\varepsilon} \cdot w^{\frac{1}{\varepsilon}} \right) dw \quad \text{Equação 15}$$

Sendo assim, há duas estimativas diferentes para o benefício total, dependendo de qual foi a forma assumida para a função de demanda, conforme pode ser visualizado na Figura 15 a seguir.

Figura 15. Curva de benefício marginal, considerando comportamento linear e logarítmico.



Fonte: adaptado de Griffin (2006).

A área $a + b$ é um valor finito enquanto a área $a + b + c$ é infinita. A primeira medida é provavelmente subestimada e a segunda superestimada. O ponto de expansão real (W, P) é o ponto confiável para a curva de benefício marginal. Conforme modificamos w e p , nos afastando do ponto de expansão a estimativa da curva de demanda se torna menos confiável, assim como suas aplicações. No entanto, as aplicações mais úteis para funções de demanda não envolvem a utilização de grandes desvios a partir das condições de base.

Esta metodologia se aplica para circunstâncias em que déficits de abastecimento de água irão reduzir as entregas de água, e pode ser necessário saber o valor potencial de perdas para que seja possível decidir o quanto as técnicas de salvaguarda podem ser justificáveis. Nestas circunstâncias, o limite inferior da integral seria o novo valor de entrega, abaixo do valor de consumo utilizado como ponto de expansão.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho contou com o desenvolvimento de uma rotina computacional para realizar a alocação dos recursos hídricos de forma a atender às demandas para benefício imediato ou priorizar o armazenamento para benefícios futuros. A priorização de armazenamento para atender a demandas futuras foi feita a partir de fatores de salvaguarda (*hedging*). A rotina foi implementada no MS EXCEL com o auxílio do aplicativo *solver*. Foram empregados dados básicos de um sistema de reservatórios – como séries de vazões naturais afluentes, volumes úteis, curvas cota \times área \times volume, taxas de evaporação e vazões mínimas defluentes.

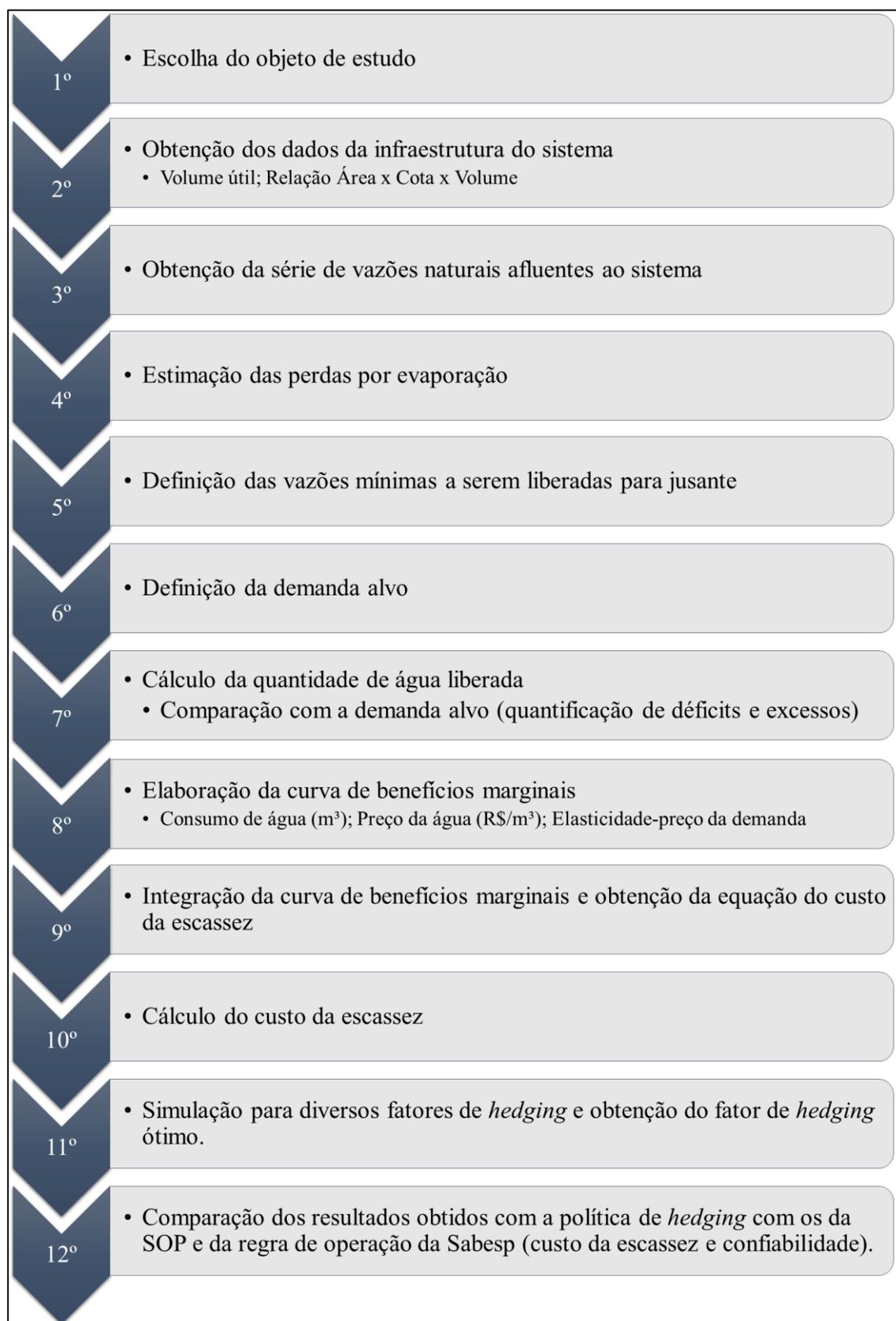
O critério de desempenho empregado aqui para nortear o algoritmo de alocação da água disponível foi o custo da escassez hídrica. Assim, o objetivo é encontrar a estratégia de operação do reservatório que minimize o custo da escassez. A variável de decisão é o próprio fator de *hedging*, que determina o quanto a vazão liberada é reduzida para criar uma salvaguarda de armazenamento. Reduzir a vazão liberada no presente tem como resultado a geração de custos de escassez, entretanto a salvaguarda criada será empregada para atenuar prováveis custos de escassez futuros, se o sistema se deparar com um regime de vazões muito baixas (estiagem). O fator de *hedging* “ótimo” buscado é aquele que produz uma combinação de custos de escassez presentes e futuros que seja a menor possível.

Além disso, foi verificada a confiabilidade do sistema de reservatórios para o fator de *hedging* que minimiza o custo da escassez e também para o caso de o sistema operar com a política padrão de operação (SOP).

Também foi calculada a soma do quadrado dos déficits para fins de comparação entre as políticas analisadas e a soma do quadrado dos vertimentos para verificar se o fator de *hedging* que minimiza o custo da escassez, minimiza também as perdas por vertimento, haja vista que o volume de água vertido não é utilizado para o abastecimento urbano da área atendida pelo sistema de reservatórios analisado.

Os itens que seguem apresentam o sistema de reservatórios que serviu como estudo de caso do presente trabalho, os dados obtidos e como foi elaborada a rotina computacional supracitada, conforme explicitado no fluxograma da Figura 16 a seguir.

Figura 16. Fluxograma metodológico seguido para execução do presente trabalho.



4.1 OBJETO DE ESTUDO

O presente trabalho teve como objeto de estudo o Sistema Cantareira, que abrange seis reservatórios, ligados por túneis e canais: Jaguari e Jacareí (que funcionam como um reservatório único), Cachoeira, Atibainha, Paiva Castro e Águas Claras, conforme pode ser visualizado na Figura 17 a seguir.

Figura 17. Esquema ilustrativo do Sistema Cantareira.

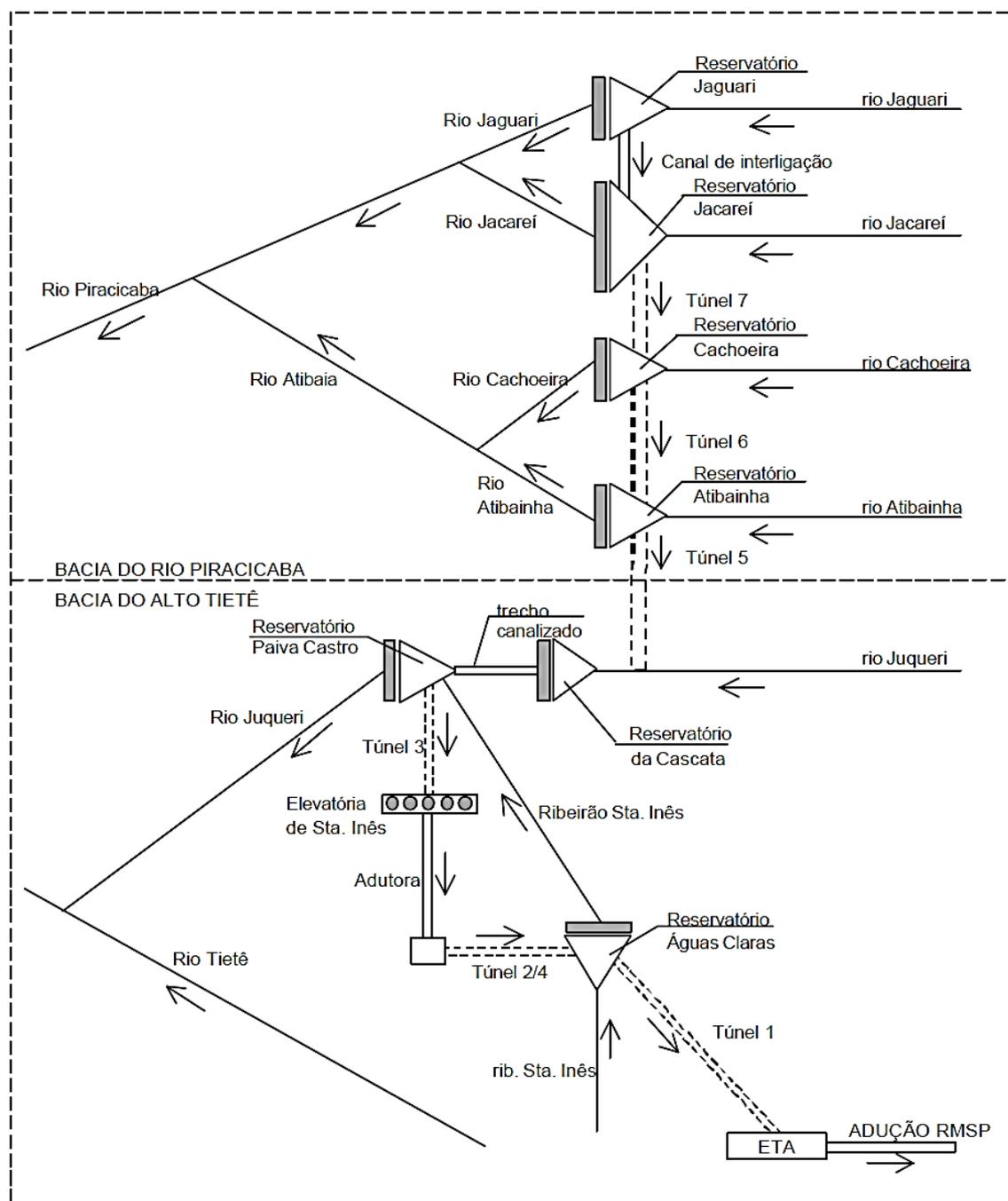


Fonte: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sof/SistemaCantareira.png>>.

As Represas Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha estão localizadas na bacia hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Bacia Hidrográfica PCJ). As represas Paiva Castro e Águas Claras estão localizadas na bacia hidrográfica do Alto Tietê e têm o objetivo de reter e transpor água para a Estação de Tratamento de Água (ETA) Guaraú.

A partir da represa Paiva Castro a água é bombeada na estação elevatória Santa Inês (com capacidade nominal de 33 m³/s), até a represa Águas Claras, de onde é aduzida até a ETA Guaraú, a qual é operada pela Sabesp e tem como finalidade o abastecimento de água para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A Figura 18 a seguir exibe um diagrama simplificado do Sistema Cantareira.

Figura 18. Diagrama simplificado do Sistema Cantareira.



Fonte: Portaria DAEE nº 1213 de agosto de 2004.

A primeira concessão para a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) para utilização das águas do Sistema Cantareira foi realizada em 1974, pelo Ministério de Minas e Energia (MME). No ano 2000, houve a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), e esta passou a assumir a concessão de outorgas, de modo que, em articulação com o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

(DAEE) e com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), formalizou uma proposta de condições de operação dos reservatórios do Sistema Cantareira.

No ano de 2004, ocorreu a primeira renovação da outorga, autorizando à Sabesp o uso dos recursos hídricos do Sistema Cantareira para fins de abastecimento público, com prazo de dez anos. Sendo assim, ficou prevista uma nova renovação da outorga para o ano de 2014, mas esta foi adiada, de modo que o processo de renovação está previsto para ser concluído até o dia 31 de maio de 2017 (Resolução Conjunta ANA-DAEE nº 1.200/2015).

Desta forma, os dados utilizados no presente trabalho são baseados na outorga concedida pelo DAEE em 6 de agosto de 2004, por meio da Portaria DAEE nº 1213/2004 por delegação da ANA através da Resolução ANA nº 429/2004.

As informações hidrológicas utilizadas neste trabalho contemplam quatro dos reservatórios que compõe o Sistema Cantareira, de modo que a Represa Águas Claras não foi abordada pois consiste em um reservatório de segurança para produção de água tratada na Estação de Tratamento de Água (ETA) Guaraú. As informações básicas dos reservatórios analisados são exibidas na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3. Detalhes das estruturas hidráulicas dos reservatórios analisados.

Características	Jaguari-Jacaré	Cachoeira	Atibainha	Paiva Castro
Período de construção	1977 a 1982	1969 a 1974	1969 a 1973	1968 a 1972
Início de operação	maio/1982	nov/1974	fev/1975	maio/1973
Precipitação méd. bacia (mm)	1.592	1763	1642	1593
Área de drenagem (km ²)	1.230	392	312	369
Vazão média (m ³ /s)	25,2	8,5	6,0	4,6
Volume útil (hm ³)	808,12	69,75	95,26	7,61
Volume morto (hm ³)	239,43	46,81	194,93	25,33
Área inundada máxima (km ²)	49,91	8,6	21,8	4,6
Área inundada mínima (km ²)	21,15	5,2	17,8	3,8
NA máximo normal (m):	844,00	821,88	786,72	745,61
NA mínimo normal (m):	820,80	811,72	781,88	743,80

Fonte: Dados de referência acerca da outorga do Sistema Cantareira (ANA-DAEE, 2016).

NA: Nível d'água.

4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS E ELABORAÇÃO DA ROTINA COMPUTACIONAL

Definido o objeto de estudo, foram obtidas as séries de vazões naturais médias mensais afluentes para cada um dos quatro reservatórios analisados (Figura 19 a Figura 24), as quais contemplaram 86 anos de dados, compreendidos no período de janeiro de 1930 a dezembro de 2015 (ANA-DAEE, 2016).

Figura 19. Série de vazões médias mensais do rio Jaguari no Aproveitamento Jaguari-Jacareí.

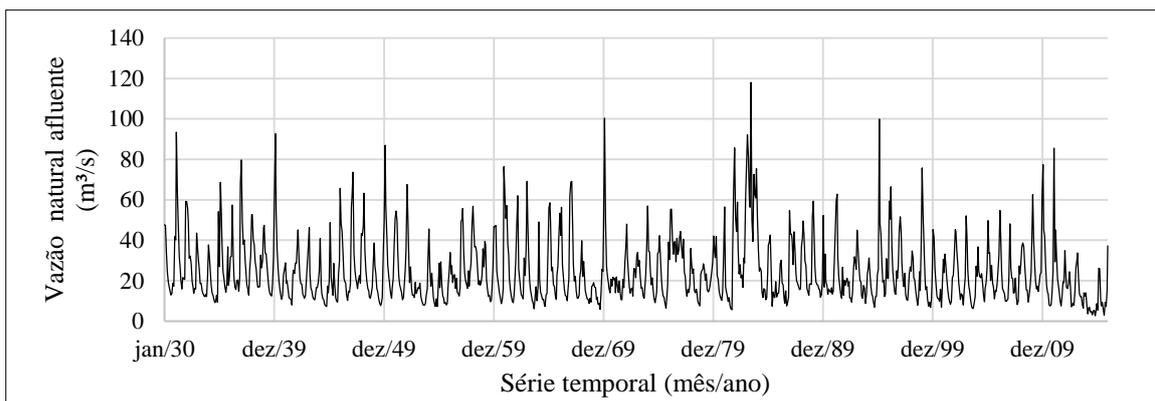


Figura 20. Série de vazões médias mensais do rio Cachoeira no Aproveitamento Cachoeira.

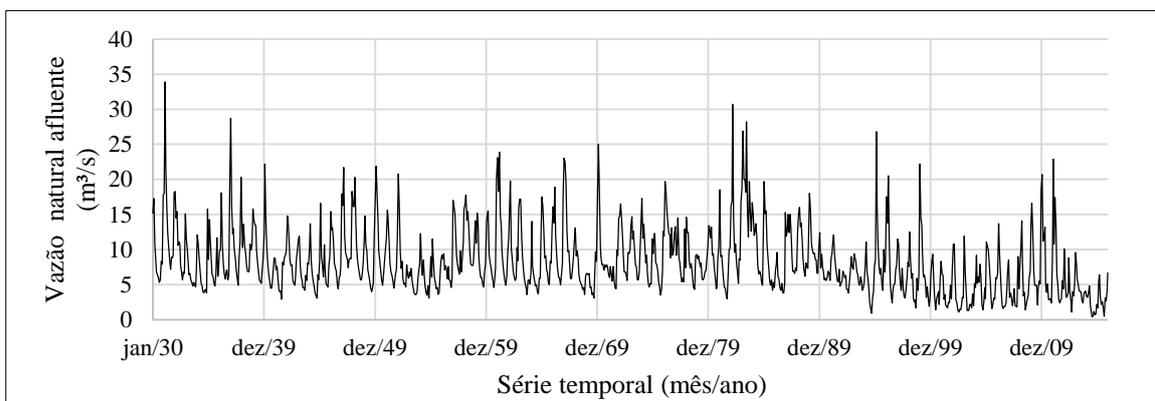


Figura 21. Série de vazões médias mensais do rio Atibainha no Aproveitamento Atibainha.

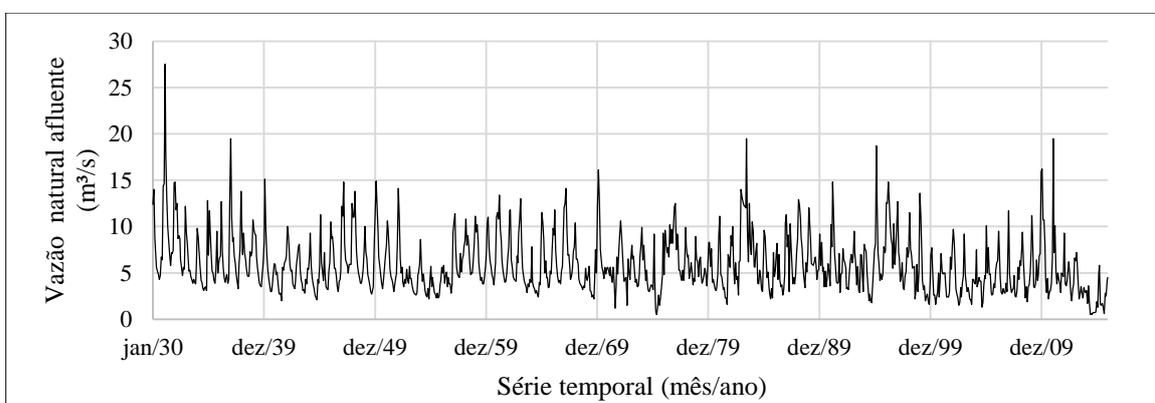
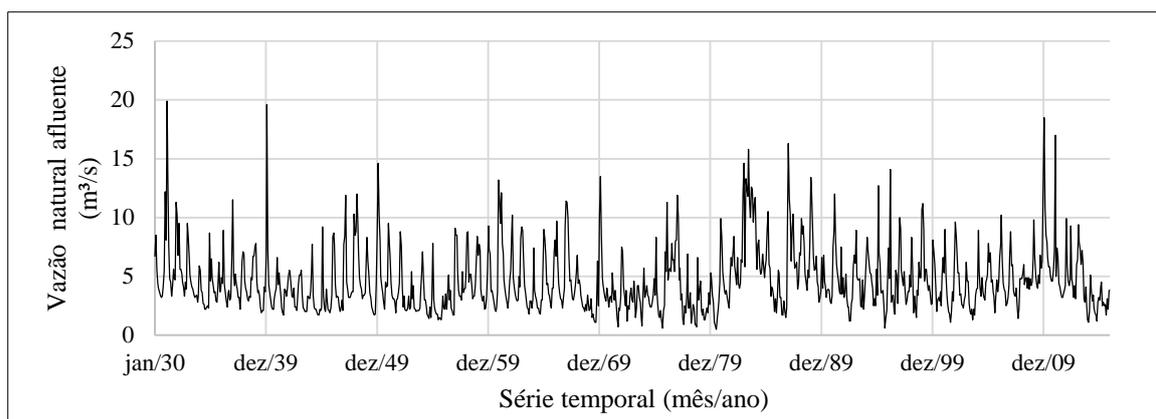


Figura 22. Série de vazões médias mensais do rio Juqueri no Aproveitamento Paiva Castro.



A série de vazões apresentada na Figura 23 corresponde à soma das vazões afluentes aos reservatórios que compõem o Sistema Equivalente (Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha) e a série apresentada na Figura 24 corresponde às vazões afluentes ao Sistema Equivalente somadas as vazões afluentes ao reservatório Paiva Castro.

Figura 23. Série de vazões médias mensais do Sistema Equivalente (Jaguari-Jacareí + Cachoeira + Atibainha).

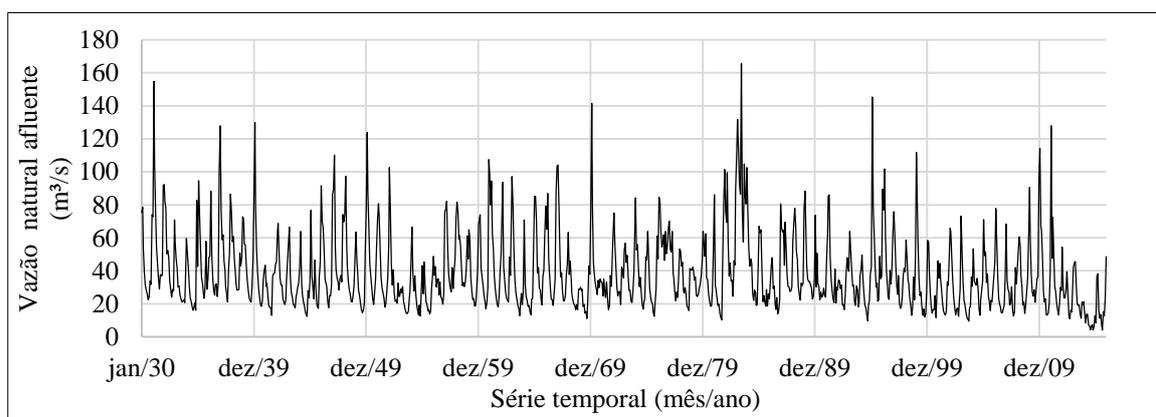
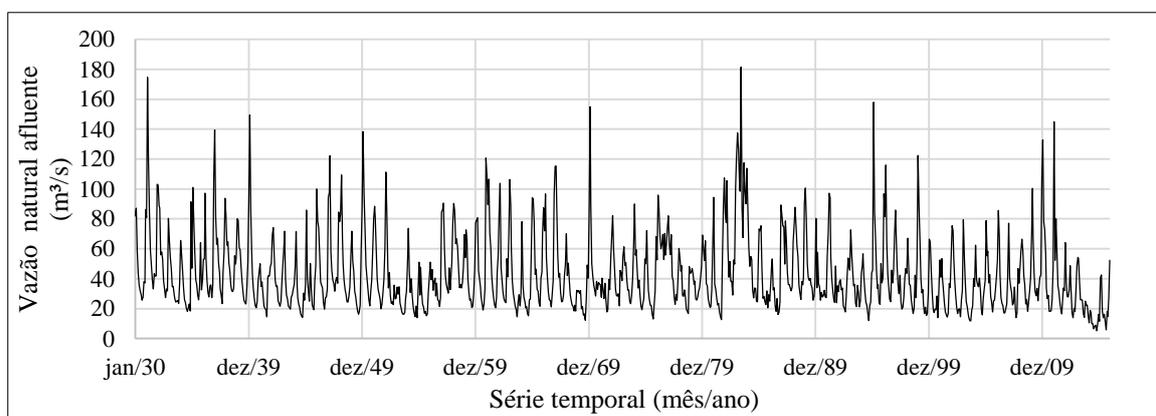


Figura 24. Série de vazões médias mensais afluentes aos quatro reservatórios do Sistema Cantareira (Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro).



O primeiro passo para a realização do trabalho foi elaborar uma rotina no programa Microsoft Excel para que, ao inserir os valores das vazões afluentes ao sistema, o software calculasse para cada mês:

- o volume armazenado no reservatório no início do período (correspondente à situação do reservatório no final do período anterior);
- o somatório dos volumes afluentes ao sistema no período;
- o volume de água perdido por evaporação no período;
- a vazão mínima defluente dos reservatórios no período;
- a disponibilidade hídrica no período;
- o volume liberado para atendimento das demandas no período; e
- o volume de água armazenado no reservatório ao final do período (correspondente à condição de armazenamento inicial do reservatório no período subsequente).

Para dar início ao modelo foi fixado um valor de armazenamento inicial correspondente à 50% do volume útil do sistema. Feito isso, foi calculado o volume de água afluente para o período utilizando os dados disponíveis de vazões afluentes, em m^3/s e converteu-se para hm^3 , a partir da multiplicação da vazão afluente pela quantidade de segundos existentes no período em questão, conforme a Equação 16 a seguir.

$$Q \frac{m^3}{s} \times \frac{86400 s}{1 dia} \times n^{\circ} \text{ de dias existentes no período} \quad \text{Equação 16}$$

Para o cálculo do volume de água perdido por evaporação, foi definida uma equação para relacionar a quantidade de água no volume útil do reservatório com a área do espelho d'água formado. Para tal, foi necessário estabelecer esta relação para cada um dos quatro reservatórios analisados (da Figura 25 até a Figura 28 e Tabela 4) e posteriormente estabelecer uma relação que apresentasse uma boa aproximação para as condições do sistema como um todo (Tabela 5). Os dados utilizados foram obtidos a partir da Nota Técnica Conjunta ANA-DAEE “Dados de Referência Acerca da Outorga do Sistema Cantareira” de 30 de abril de 2016, onde são explicitadas as informações do relatório Sabesp “Consolidação das principais características operacionais do Sistema Cantareira – relatório final – out/09”, elaborado por Hidro Engenheiros Consultores Ltda.

Figura 25. Relação área x volume para o reservatório Jaguari-Jacareí.

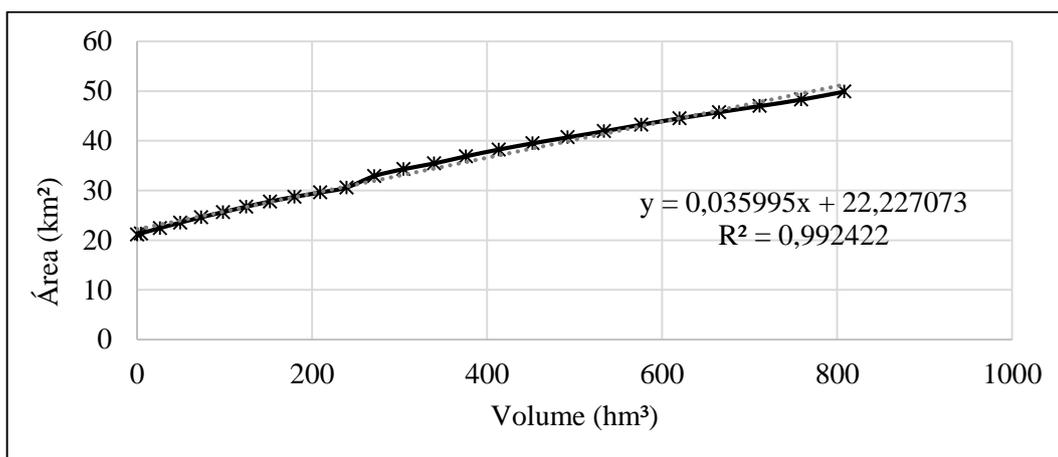


Figura 26. Relação área x volume para o reservatório Cachoeira.

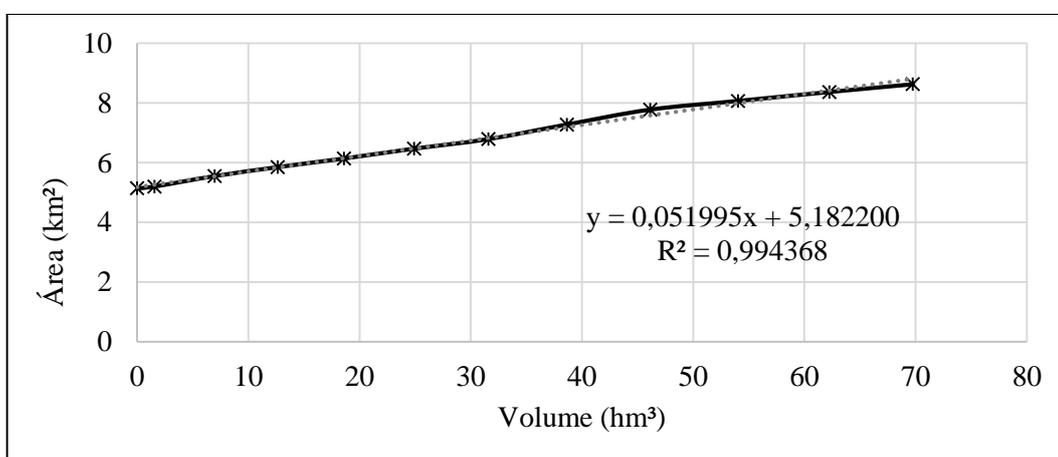


Figura 27. Relação área x volume para o reservatório Atibainha.

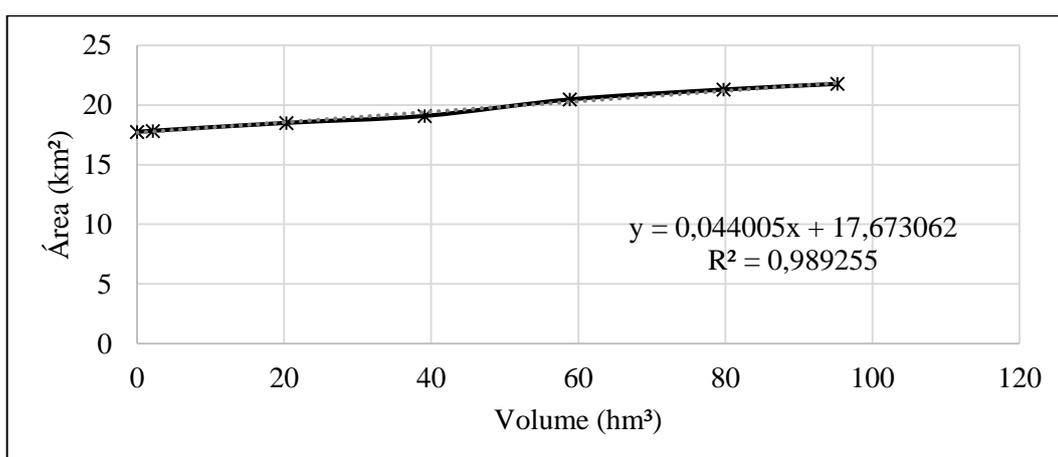


Figura 28. Relação área x volume para o reservatório Paiva Castro.

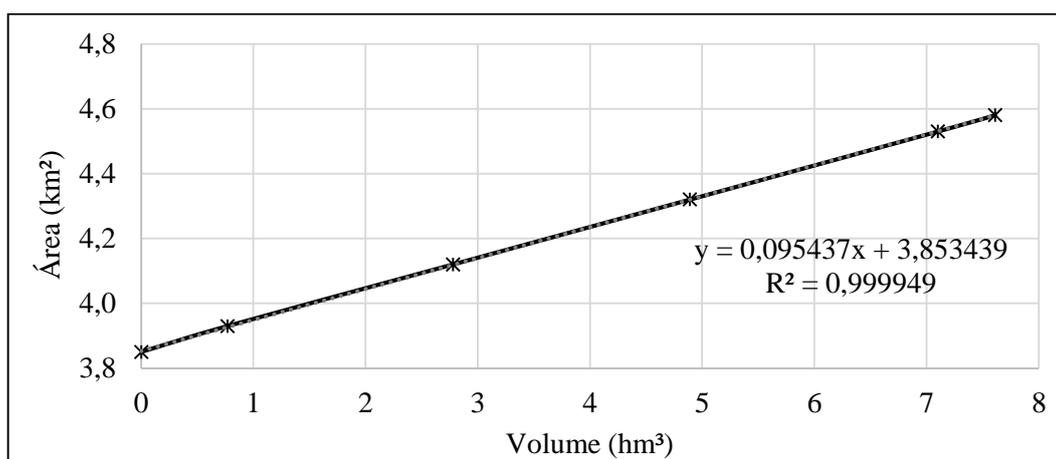


Tabela 4. Relação Área do espelho d'água x Volume útil para cada um dos quatro reservatórios analisados

% do Volume útil	Jaguari - Jacareí		Cachoeira		Atibainha		Paiva Castro	
	Volume útil (hm³)	Área (km²)						
100	808,12	51,32	69,75	8,81	95,26	21,87	7,61	4,58
90	727,32	48,41	62,78	8,45	85,74	21,45	6,85	4,51
80	646,50	45,50	55,80	8,08	76,22	21,03	6,09	4,43
70	565,67	42,59	48,83	7,72	66,69	20,61	5,33	4,36
60	484,85	39,68	41,85	7,36	57,17	20,19	4,57	4,29
50	404,02	36,77	34,88	7,00	47,64	19,77	3,81	4,22
40	323,20	33,86	27,90	6,63	38,12	19,35	3,05	4,14
30	242,38	30,95	20,93	6,27	28,59	18,93	2,28	4,07
20	161,55	28,04	13,95	5,91	19,07	18,51	1,52	4,00
10	80,73	25,13	6,97	5,54	9,54	18,09	0,76	3,93
0	0,00	22,23	0,00	5,18	0,00	17,67	0,00	3,85

Tabela 5. Relação Área do espelho d'água x Volume útil para o Sistema Cantareira*

% do Volume útil	Volume útil (hm ³)	Área (km ²)
100	980,74	86,57
90	882,69	82,81
80	784,60	79,04
70	686,52	75,28
60	588,43	71,52
50	490,35	67,75
40	392,26	63,99
30	294,18	60,22
20	196,09	56,46
10	98,01	52,70
0	0,00	48,94

Obs.: desconsiderando-se a área do espelho d'água da represa Águas Claras.

A partir das informações apresentadas na Tabela 5, foi possível realizar uma regressão linear que encontrou a seguinte equação para descrever como a área do espelho d'água (km²) varia com o volume de água armazenado (hm³), conforme a Equação 17.

$$\text{Área do espelho d'água} = (0.038372 \times \text{Volume}) + 48.936061 \quad \text{Equação 17}$$

Cabe ressaltar que os valores apresentados na Tabela 4 foram calculados utilizando-se as equações obtidas por meio de regressão linear apresentadas nos gráficos da Figura 25 até a Figura 28. E a relação área do espelho d'água x volume útil para o Sistema Cantareira como um todo foi calculada a partir da soma das áreas e volumes dos reservatórios formadores do sistema (Tabela 5); por esse motivo, a regressão linear que descreve a relação área do espelho d'água x volume útil do Sistema Cantareira possui fator de correlação igual a um ($R^2 = 1$).

Depois de obtida a relação entre o volume de água armazenado e a área do espelho d'água formado, foi necessário encontrar uma aproximação para a taxa de evaporação mensal para os reservatórios do Sistema Cantareira. Para estimar o volume perdido dos reservatórios pela evaporação, foram utilizadas informações de evaporação existentes para dois reservatórios do Estado de São Paulo, Billings e Guarapiranga, disponíveis no documento sobre evaporação líquida nas usinas hidrelétricas do Operador Nacional do

Sistema Elétrico (ONS, 2004), e a partir destes valores, calculou-se o valor médio para cada mês, conforme exibido na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6. Resultados de evaporação líquida (mm/mês) estimados pelo programa SisEvapo, segundo as Normais Climatológicas 1931 a 1990.

Período	Res. Billings (Cód. 62285000)	Res. Guarapiranga (Cód. 62290000)	Média: Estimativa para o Sistema Cantareira
Janeiro	5	8	6,5
Fevereiro	10	13	11,5
Março	36	35	35,5
Abril	45	38	41,5
Mai	47	37	42
Junho	42	34	38
Julho	28	25	26,5
Agosto	22	25	23,5
Setembro	17	22	19,5
Outubro	1	8	4,5
Novembro	-4	5	0,5
Dezembro	8	15	11,5

Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2004).

Dado que os dados de evaporação líquida são utilizados para obter a série de vazões naturais a partir da série de vazões verificada nas estações fluviométricas, utilizou-se estas informações de evaporação líquida de modo a trabalhar com uma maior margem de segurança, tornando o sistema mais restritivo, sem, no entanto, gerar impactos relevantes nos resultados, uma vez que estes valores de evaporação líquida foram aplicados para todos os cenários (política padrão de operação, política de hedging de um ponto e regra de operação da Sabesp).

Desta forma, para calcular o volume de água perdido por meio da evaporação, e dado que os valores estão em milímetros, realizou-se a conversão de milímetros para hectômetros cúbicos a partir da multiplicação dos valores de evaporação (E_0) pela área do espelho d'água obtido através da Equação 17, conforme a Equação 18 a seguir.

$$E_0 (mm) = \frac{E_0 \times 0,001 m^3}{1 m^2} \rightarrow \frac{E_0 \times 10^{-9} hm^3}{1 m^2} \times \frac{10^4 m^2}{1 km^2} \times \text{Área} (km^2) \quad \text{Equação 18}$$

Além das perdas por evaporação, foi necessário retirar da quantidade de água disponível para atendimento das demandas as vazões mínimas defluentes, definidas segundo os Artigos 8º e 9º da Portaria DAEE nº 1213 de 2004.

ARTIGO 8º - As vazões mínimas defluentes de cada um dos reservatórios citados no §1º do artigo 4º serão propostas, mensalmente, pelo Comitê PCJ, em conformidade com o estabelecido no artigo 4º da Resolução Conjunta ANA-DAEE nº 428 de 4 de agosto de 2004.

ARTIGO 9º - Deverá ser mantida uma vazão defluente mínima de 1 m³/s no rio Juqueri a jusante da barragem de Paiva Castro.

Estas vazões defluentes mínimas que devem ser liberadas para jusante (J_i), são restrições impostas pela legislação para operação do Sistema Cantareira, de forma a garantir uma vazão mínima nos cursos d'água à jusante dos barramentos do sistema. Faz-se necessário esclarecer que as retiradas do Sistema Cantareira para atendimento às demandas da RMSP são realizadas por meio de bombeamento em estação elevatória diretamente do reservatório Paiva Castro. Desta forma, deve-se atentar para o fato de que no presente trabalho as vazões para jusante não visam o atendimento das demandas (33 m³/s para atendimento da RMSP), mas sim, devem ser subtraídas da disponibilidade hídrica, uma vez que devem ser obrigatoriamente liberadas para jusante dos barramentos por conta de imposições legais.

Então, estabeleceu-se no modelo que as vazões defluentes do sistema como um todo (reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro) são calculadas de acordo com as vazões defluentes definidas para o Sistema Equivalente (reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha) somadas à 1m³/s (referente a vazão defluente mínima do reservatório Paiva Castro).

Para definição das vazões defluentes mínimas do Sistema Equivalente, observou-se o que consta na Portaria DAEE nº1213 de 2004 e no Anexo I da Deliberação Conjunta dos Comitês PCJ nº 013/04, de 05/08/2004, a qual dispõe sobre as condições de operação dos reservatórios Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha, localizados na Bacia do Rio Piracicaba, pertencentes ao Sistema Cantareira.

A Resolução Conjunta ANA-DAEE nº 428/04 define de que modo devem ser distribuídas as vazões de retirada do Sistema Equivalente (Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha):

Art. 1º A operação do Sistema Cantareira observará o limite de vazão de retirada, denominado X, obtido em função do estado do Sistema Equivalente, segundo a tabela e correspondentes curvas mensais do Anexo I a esta Resolução.

§1º A capacidade do Sistema Equivalente representa a soma dos volumes úteis operacionais existentes nos reservatórios de Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha, totalizando 978,57 hm³.

§2º A vazão de retirada do Sistema Equivalente, denominada Q, é a soma da vazão de transferência para a bacia do Alto Tietê, através do Túnel 5, denominada Q₁, e da soma das vazões defluentes dos reservatórios de Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha para a Bacia do Rio Piracicaba, excluindo-se os vertimentos, denominada Q₂.

§3º A tabela e as correspondentes curvas mensais de que trata o caput foram calculadas com o emprego de “Curvas de Aversão a Risco”, conforme Nota Técnica Conjunta ANA-DAEE.

Art. 2º O limite de vazão de retirada de que trata o art. 1º será fracionado em duas parcelas, denominadas X₁ e X₂, correspondentes respectivamente à região metropolitana de São Paulo e à Bacia do Rio Piracicaba, de tal forma que $X = X_1 + X_2$ e obedecerá a seguinte ordem de prioridade:

Usuário	Limite de vazão de retirada (m ³ /s)	Prioridade
Região Metropolitana primária	24,8	1
Bacia do Piracicaba primária	3,0	1
Região Metropolitana secundária	6,2	2
Bacia do Piracicaba secundária	2,0	2

Parágrafo único. No caso de não ser possível atender a soma dos valores com a mesma prioridade, o rateio será proporcional à participação de cada um no total referente à mesma prioridade.

Deste modo, ficam definidos os limites de vazão de retirada do Sistema Equivalente (Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha), conforme explicitado na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7. Limites de vazão de retirada em função do estado do Sistema Equivalente.

Limite da vazão de retirada (m ³ /s)			Estado do Sistema Equivalente (Jaguari-Jacareí + Cachoeira + Atibainha) em % do volume útil											
X ₁	X ₂	X	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
24,08	2,92	27,0	16,3	15,7	15,8	15,8	16,6	15,3	12,9	9,9	6,6	3,0	0,0	0,0
24,80	3,00	27,8	21,4	20,7	20,5	20,4	20,9	19,4	16,7	13,6	10,0	6,3	3,0	2,0
24,95	3,05	28,0	22,7	21,9	21,7	21,5	22,0	20,4	17,7	14,5	10,9	7,1	3,8	2,5
25,70	3,30	29,0	29,2	28,1	27,6	27,1	27,4	25,5	22,6	19,1	15,2	11,1	7,5	6,0
26,46	3,54	30,0	35,6	34,3	33,5	32,7	32,8	30,6	27,4	23,6	19,4	15,1	11,3	9,5
27,22	3,78	31,0	42,1	40,4	39,4	38,4	38,1	35,7	32,2	28,2	23,7	19,1	15,0	13,0
27,97	4,03	32,0	48,5	46,6	45,3	44,0	43,5	40,8	37,1	32,8	28,0	23,2	18,8	16,5
28,73	4,27	33,0	55,0	52,8	51,2	49,7	48,9	45,9	41,9	37,3	32,3	27,2	22,6	20,0
29,48	4,52	34,0	61,4	59,0	57,1	55,3	54,2	51,0	46,7	41,9	36,6	31,2	26,3	23,5
30,24	4,76	35,0	67,8	65,2	63,0	60,9	59,6	56,1	51,6	46,4	40,9	35,3	30,1	27,0
31,00	5,00	36,0	74,3	71,3	68,9	66,6	65,0	61,2	56,4	51,0	45,2	39,3	33,8	30,5

Fonte: Portaria DAEE nº1213 de 2004.

X = limite da vazão total de retirada ($X = X_1 + X_2$)

X₁ = limite para a reversão pelo Túnel 5, para a Região Metropolitana de São Paulo

X₂ = limite para a soma das vazões destinadas à Bacia do Rio Piracicaba, ou seja, as vazões defluentes do Sistema Equivalente (Jaguari-Jacareí, Cachoeira e Atibainha).

Além dos valores apresentados na Tabela 7, tendo em vista que o reservatório Paiva Castro foi considerado no presente trabalho, adicionou-se às vazões mínimas defluentes do Sistema Equivalente a quantia de 1 m³/s, referente à vazão mínima no rio Juqueri, a jusante da barragem Paiva Castro, conforme estabelecido no art. 9º da Portaria DAEE nº 1213 de 2004.

A partir do disposto na Tabela 7, para fins de elaboração da rotina computacional, foi considerado que cada valor de X₂ apresentado na Tabela 7 corresponde à uma classe, identificada por um índice i que varia de 1 a 11, de acordo com a quantidade de classes apresentadas na Tabela 7. Assim, as classes foram estabelecidas conforme disposto na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8. Classes definidas para estabelecimento das vazões defluentes.

Classe (i)	J _i	Jan x=1	Fev x=2	Mar x=3	Abr x=4	Mai x=5	Jun x=6	Jul x=7	Ago x=8	Set x=9	Out x=10	Nov x=11	Dez x=12
1	2,92	16,3	15,7	15,8	15,8	16,6	15,3	12,9	9,9	6,6	3,0	0,0	0,0
2	3,00	21,4	20,7	20,5	20,4	20,9	19,4	16,7	13,6	10,0	6,3	3,0	2,0
3	3,05	22,7	21,9	21,7	21,5	22,0	20,4	17,7	14,5	10,9	7,1	3,8	2,5
4	3,30	29,2	28,1	27,6	27,1	27,4	25,5	22,6	19,1	15,2	11,1	7,5	6,0
5	3,54	35,6	34,3	33,5	32,7	32,8	30,6	27,4	23,6	19,4	15,1	11,3	9,5
6	3,78	42,1	40,4	39,4	38,4	38,1	35,7	32,2	28,2	23,7	19,1	15,0	13,0
7	4,03	48,5	46,6	45,3	44,0	43,5	40,8	37,1	32,8	28,0	23,2	18,8	16,5
8	4,27	55,0	52,8	51,2	49,7	48,9	45,9	41,9	37,3	32,3	27,2	22,6	20,0
9	4,52	61,4	59,0	57,1	55,3	54,2	51,0	46,7	41,9	36,6	31,2	26,3	23,5
10	4,76	67,8	65,2	63,0	60,9	59,6	56,1	51,6	46,4	40,9	35,3	30,1	27,0
11	5,00	74,3	71,3	68,9	66,6	65,0	61,2	56,4	51,0	45,2	39,3	33,8	30,5

Tendo classificado as vazões defluentes, para inserir estes valores à rotina computacional do modelo, utilizou-se o fluxograma apresentado na Figura 29. Basicamente, o procedimento adotado consistiu em, verificado o período em questão (x = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) e o estado do sistema (em % do volume útil), analisar a classe (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11) na qual se encontra e, assim, definir a vazão defluente mínima.

Onde:

P_{x,i} é o estado do Sistema Equivalente (em % do volume útil), conforme a Tabela 8, onde x é o mês e o índice i é referente à classe;

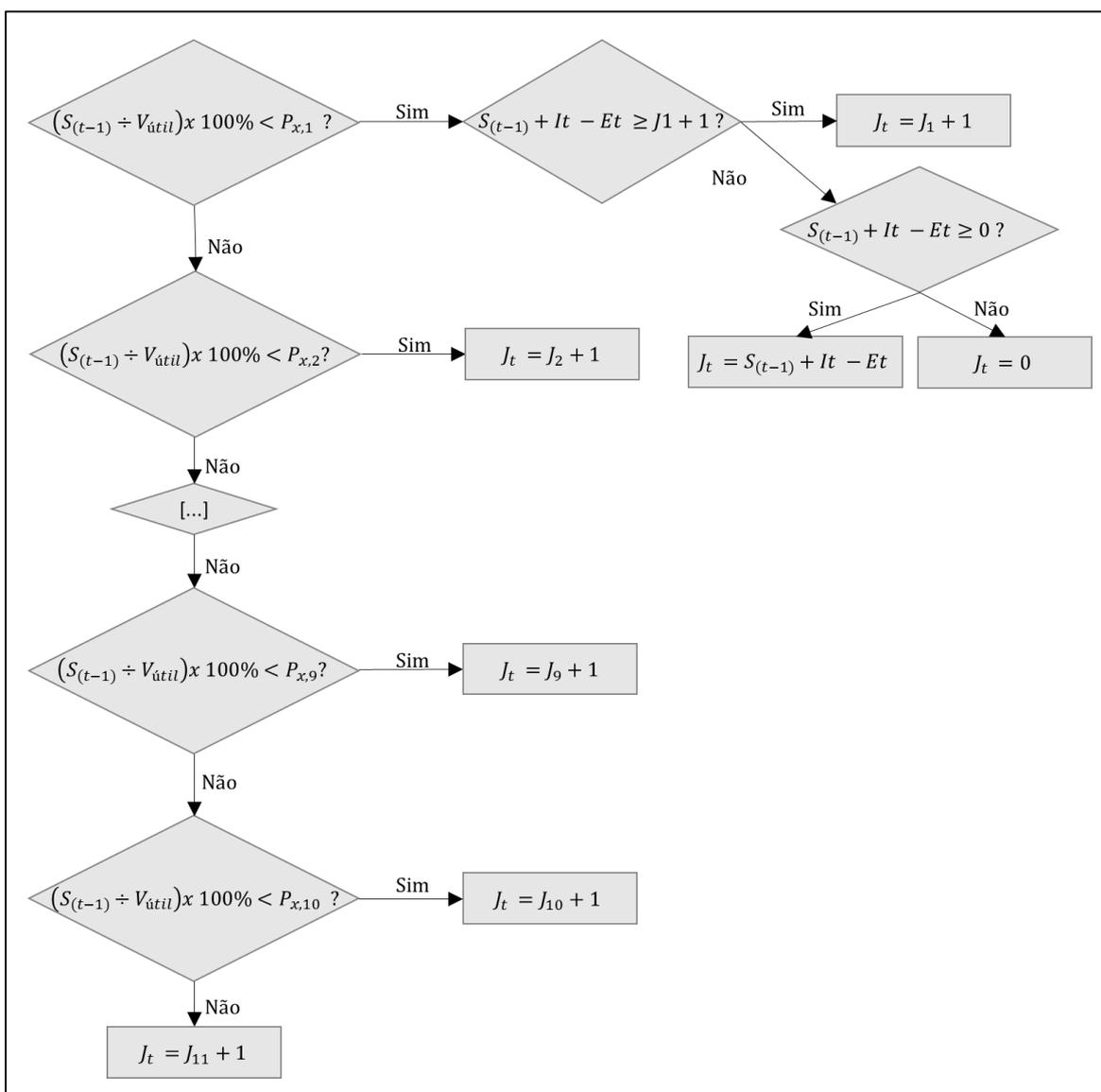
S_(t-1) é o armazenamento do sistema de reservatórios no início do período, em hm³;

V_{útil} é a soma dos volumes úteis dos reservatórios que compõe o Sistema Cantareira, em hm³;

J_t é a liberação para jusante, em hm^3 ; e

J_i é a vazão defluente mínima definida pela Portaria DAEE nº1213/2004 para o Sistema Equivalente, em função do Estado do Sistema Equivalente, em % do volume útil.

Figura 29. Fluxograma utilizado para definição das vazões defluentes do Sistema Cantareira.

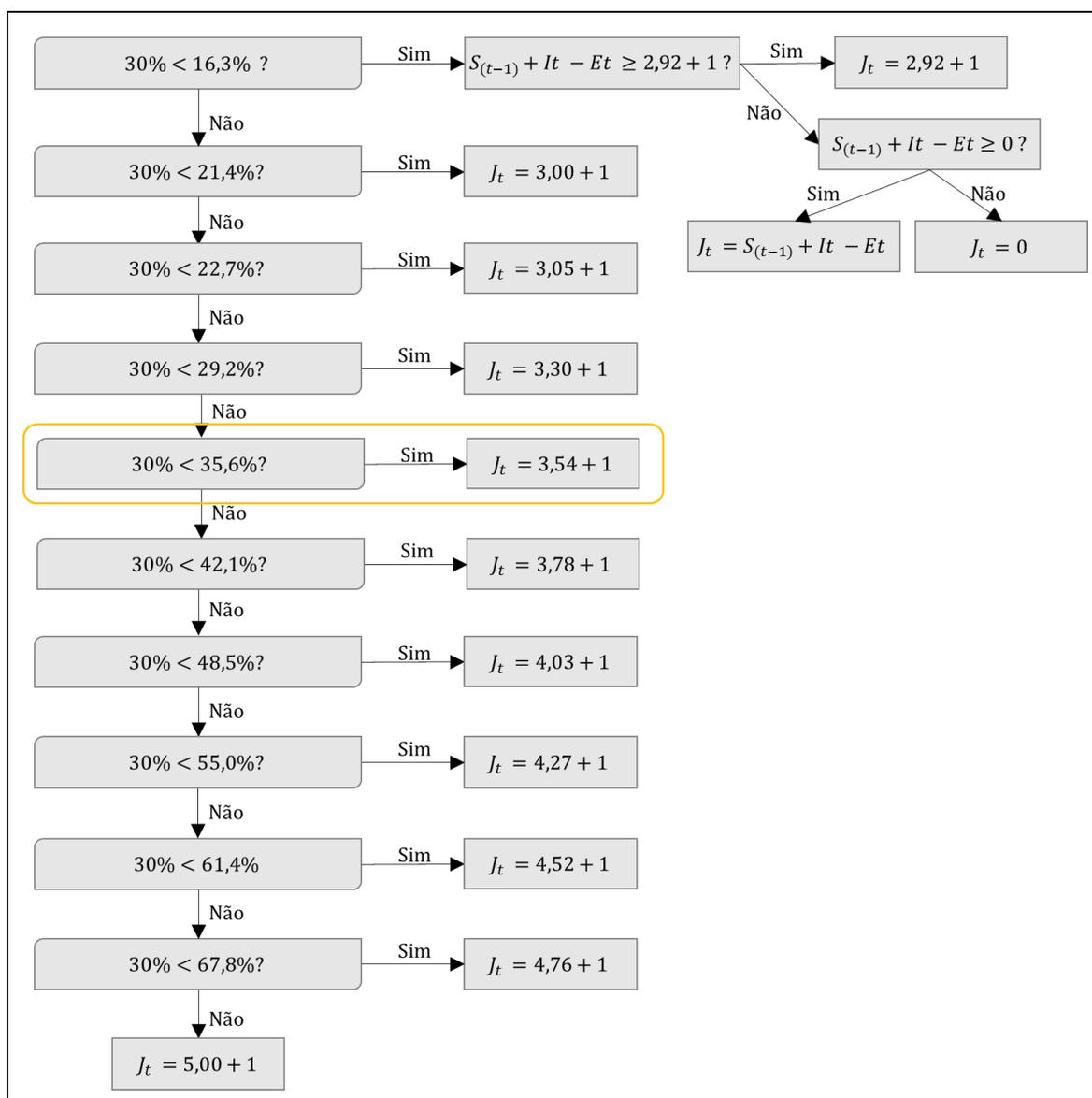


Por exemplo, caso o período em questão fosse o mês de janeiro, primeiramente deve-se verificar o estado do sistema (em % do volume útil) e comparar o valor encontrado com os limites estabelecidos para cada classe:

$P_{1,1} = 16,3\%$	$P_{1,2} = 21,4\%$	$P_{1,3} = 22,7\%$	$P_{1,4} = 29,2\%$
$P_{1,5} = 35,6\%$	$P_{1,6} = 42,1\%$	$P_{1,7} = 48,5\%$	$P_{1,8} = 55,0\%$
$P_{1,9} = 61,4\%$	$P_{1,10} = 67,8\%$	$P_{1,11} = 74,3\%$	

Isto é, se o volume de água armazenado no sistema corresponder à 30% do volume útil, o fluxograma se daria conforme explicitado na Figura 30, de forma que a vazão defluente seria igual a 4,54 m³/s.

Figura 30. Exemplo do fluxograma utilizado para definição das vazões defluentes do Sistema Cantareira para o mês de janeiro.



Cabe ainda ressaltar que apesar dos valores estabelecidos como limites das vazões de retiradas, a demanda alvo foi fixada como sendo 33 m³/s para todos os períodos analisados. Para que os valores fossem compatíveis com o restante do modelo, foi necessário converter as vazões, em metros cúbicos por segundo, para hectômetros cúbicos, conforme exibido anteriormente na Equação 16.

Desta forma, mesmo a demanda alvo sendo fixada em 33 m³/s o modelo e suas equações são elaborados em função de D_t por conta de que como os valores do modelo estão todos em hectômetros cúbicos por mês, e cada mês tem sua respectiva quantidade de dias, a demanda alvo mensal, em hm³, varia conforme o período analisado.

O próximo passo foi calcular a disponibilidade hídrica do sistema (Aw_t) para cada intervalo de tempo, a qual foi definida como sendo o volume armazenado no reservatório (S_(t-1)) somado ao volume de água afluente (I_t) menos o volume de água perdido pela evaporação (E_t) e o volume de água liberado para jusante (J_t) – referente às vazões defluentes mínimas dos barramentos do Sistema Cantareira estabelecidas pela legislação (Portaria DAEE nº1213 de 2004), as quais não são utilizadas para atendimento das demandas da RMSP, e por este motivo, devem ser descontadas da quantidade de água disponível para atendimento das demandas.

$$Aw_t = S_{(t-1)} + I_t - E_t - J_t \quad \text{Equação 19}$$

Após o cálculo da disponibilidade hídrica, para aplicação da política de *hedging* foi utilizado um artifício, reduzindo a quantidade de água disponível para atendimento à demanda no modelo de simulação. Esse procedimento realiza um desconto na disponibilidade hídrica (Aw_t) de modo a criar um excedente de volume de água que cumpre o papel de salvaguarda para períodos críticos futuros. A quantidade de água disponível (Aw_t) foi multiplicada por um fator de redução, definido como sendo a demanda alvo (D_t) dividida pela soma da demanda alvo com o fator de *hedging* (HF), conforme explicitado pela Equação 22 e pela Equação 21 a seguir.

$$\text{Fator de redução da disponibilidade hídrica} = \frac{D_t}{D_t + HF} \quad \text{Equação 20}$$

$$Awh_t = Aw_t \times \frac{D_t}{D_t + HF} = (S_{(t-1)} + I_t - E_t - J_t) \times \frac{D_t}{D_t + HF} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

Aw_t é a disponibilidade hídrica calculada pela Equação 19, em hm³;

Awh_t é a disponibilidade hídrica reduzida pelo *hedging*, em hm³;

HF é o fator de *hedging*, adimensional;

D_t é a demanda alvo, em hm³;

J_t é a liberação para jusante (não é utilizada para atendimento das demandas), em hm³;

R_t é a quantidade de água liberada para atendimento das demandas, em hm³; e

$S_{(t-1)}$ é o armazenamento do reservatório no final do período anterior, em hm³.

Desta forma, um fator de *hedging* igual a 100, por exemplo, resultaria em uma disponibilidade hídrica para atendimento da demanda correspondente a 45% do valor original da disponibilidade hídrica calculada pela Equação 19; e um fator de *hedging* igual a 500, por exemplo, resultaria em uma disponibilidade hídrica para atendimento da demanda correspondente a 15% do valor original da disponibilidade hídrica calculada pela Equação 19, conforme explicitado na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9. Exemplificação de fatores de redução em função de um dado fator de *hedging*.

Demanda (m ³ /s)	Nº de dias	Demanda D _t (hm ³)	Fator de <i>hedging</i> (HF)	Fator de redução
33,0	28	79,83	100	$\frac{79,83}{79,83 + 100} = 0,4439$
33,0	29	82,68	100	$\frac{82,68}{82,68 + 100} = 0,4526$
33,0	30	85,54	100	$\frac{85,54}{85,54 + 100} = 0,4610$
33,0	31	88,39	100	$\frac{88,39}{88,39 + 100} = 0,4692$
33,0	28	79,83	500	$\frac{79,83}{79,83 + 500} = 0,1377$
33,0	29	82,68	500	$\frac{82,68}{82,68 + 500} = 0,1419$
33,0	30	85,54	500	$\frac{85,54}{85,54 + 500} = 0,1461$
33,0	31	88,39	500	$\frac{88,39}{88,39 + 500} = 0,1502$

Cabe ressaltar que a decisão de liberação baseada na disponibilidade de água reduzida pelo fator de *hedging* apresentada na Equação 21 configura uma política de *hedging* de um ponto. Caso a decisão de liberação fosse baseada na disponibilidade de água calculada pela Equação 19, estaria configurada a política padrão de operação (*Standard Operating Policy – SOP*).

Para definir a quantidade de água liberada para o atendimento das demandas em cada período de tempo analisado foi aplicado o fluxograma ilustrado na Figura 31.

Onde:

Aw_t é a disponibilidade hídrica calculada pela Equação 19, em hm^3 ;

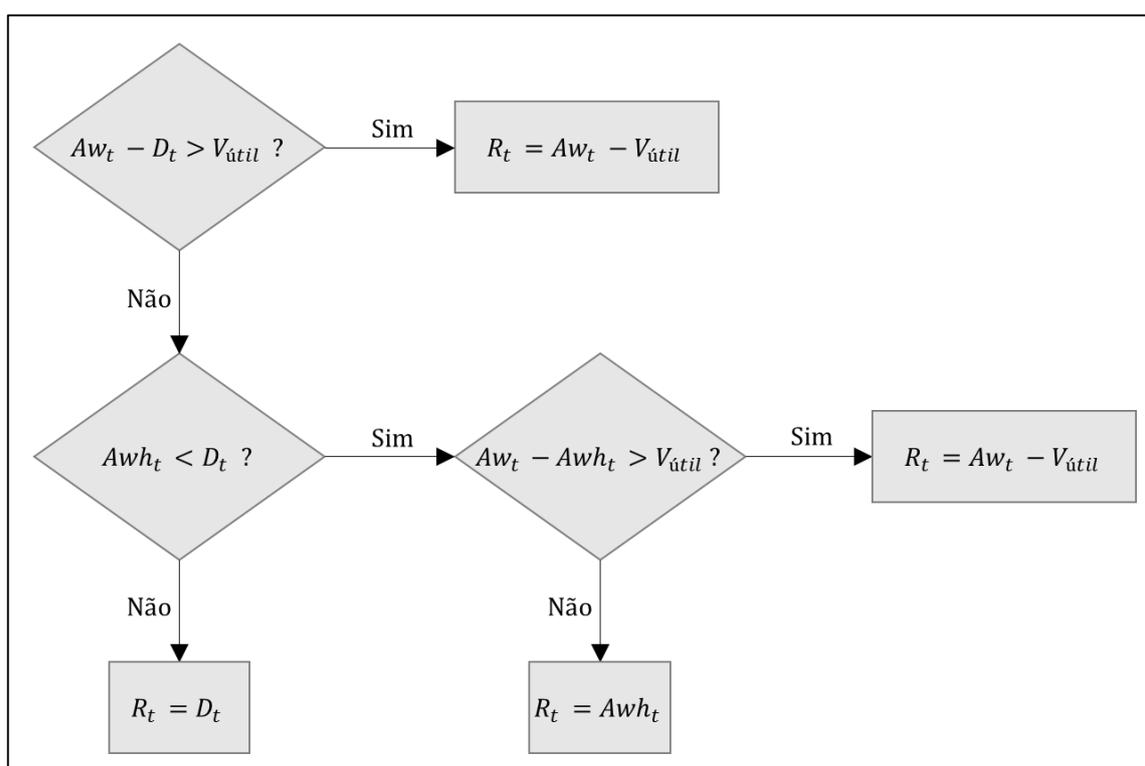
Awh_t é a disponibilidade hídrica reduzida pelo *hedging* conforme mostra a Equação 21, em hm^3 ;

D_t é a demanda alvo, em hm^3 ;

R_t é a quantidade de água liberada para atendimento das demandas, em hm^3 ; e

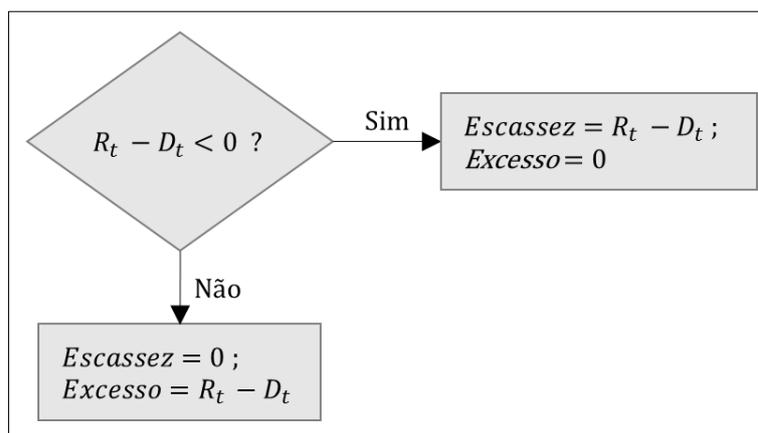
$V_{útil}$ é a soma dos volumes úteis dos reservatórios que compõe o Sistema Cantareira, em hm^3 .

Figura 31. Fluxograma para definir o volume de água liberado em cada intervalo de tempo.



Definidas as liberações de água, foi verificado se houve escassez no período analisado, ou seja, se a demanda alvo foi atendida pela quantidade de água liberada. Caso a quantidade de água liberada fosse menor do que a demanda alvo, uma falha era computada e quantificada em relação à sua magnitude; isto é, calculou-se a quantidade de água faltante para que a demanda alvo fosse atendida (Figura 32), aqui denominado de escassez.

Figura 32. Fluxograma da verificação da existência de escassez ou excesso em cada período.



4.3 CURVA DE DISPONIBILIDADE A PAGAR (BENEFÍCIO MARGINAL) E CUSTO DA ESCASSEZ

Para calcular o custo da escassez, o primeiro passo consistiu em utilizar o método *Point Expansion* (GRIFFIN, 2006) para traçar a curva de disponibilidade a pagar. Para isso foi preciso definir um ponto na função de demanda (**w**: quantidade da água; **p**: preço), e um valor estimado da elasticidade-preço da demanda.

Para a definição da quantidade de água utilizou-se o valor de 33 m³/s, o qual corresponde à 85.536.000 m³ para o período de 30 dias. Para a definição do preço, optou-se por utilizar o valor da tarifa média praticada no Estado de São Paulo, obtida a partir do Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de 2014 (BRASIL, 2015), de forma que foi atribuído para o preço o valor de R\$ 2,26 por metro cúbico.

Embora saiba-se que desta demanda de 33 m³/s uma parte é perdida na rede de distribuição, aproximadamente 33% para o Estado de São Paulo, segundo o Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos de 2014 (BRASIL, 2015), considerou-se que os prejuízos decorrentes destas perdas são repassados para os usuários pagantes de forma que pode-se utilizar o preço de R\$2,26/m³ para análise da disponibilidade a pagar. Ressalta-se que as fontes disponíveis não fazem distinção de perdas físicas (vazamentos na rede) e perdas referentes a ligações clandestinas (água não faturada). Na prática, uma ligação clandestina, embora não faturada, é utilizada para atender parte da demanda, o que não acontece com uma perda física. Como nesse trabalho não existe essa distinção, a demanda atendida é superestimada, configurando uma limitação.

A elasticidade-preço da demanda da água foi definida a partir dos valores disponíveis na literatura; porém, como não foram encontrados valores específicos para o abastecimento

urbano e/ou residencial para a área de estudo e também devido à incerteza em sua definição, foram realizadas simulações utilizando-se diferentes valores para abastecimento urbano e residencial, explicitados na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10. Valores de elasticidade-preço da demanda da água utilizados para obtenção das curvas de disponibilidade a pagar.

Elasticidade-preço da demanda (E)	Caracterização	Abrangência	Autor
-0,60	Residencial	Brasil	Bhatia et al. (1995)
-0,24	Residencial	Usuários da SANEPAR	Andrade et al. (1995)
-0,32	Abastecimento Urbano	Bacia Hidrográfica do Rio Pardinho	Alvim (2005)
-0,46	Abastecimento Urbano	Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba	Medeiros e Ribeiro (2006)
-0,405	Média dos valores encontrados para abastecimento urbano e residencial		

Desta forma, foram realizadas cinco simulações – uma para cada valor de elasticidade-preço da demanda da água exibidos na Tabela 10.

Depois de definidos os parâmetros necessários para a aplicação do método *Point Expansion* (**W**: quantidade de água = 85.536.000 m³; **P**: preço = R\$2,26/m³; **E**: elasticidade = -0,60; -0,24; -0,32; -0,46; -0,405), foi possível obter cinco equações para descrever a curva de disponibilidade a pagar, para qual foi atribuído o comportamento logarítmico, descrito pela Equação 22 a seguir.

$$\ln w = \varepsilon \cdot \ln p + \ln k \quad \text{Equação 22}$$

Para obter as cinco equações para descrever a curva de disponibilidade a pagar, calculou-se o valor da constante arbitrária (k) com os valores de entrada através da Equação 23, e posteriormente inseriu-se este valor e o valor da elasticidade na Equação 22, de modo que, ao variar o valor da tarifa, obteve-se a quantidade de água correspondente.

$$k = \frac{W}{P^\varepsilon} \quad \text{Equação 23}$$

Figura 33. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a $-0,24$ ($\epsilon = -0,24$).

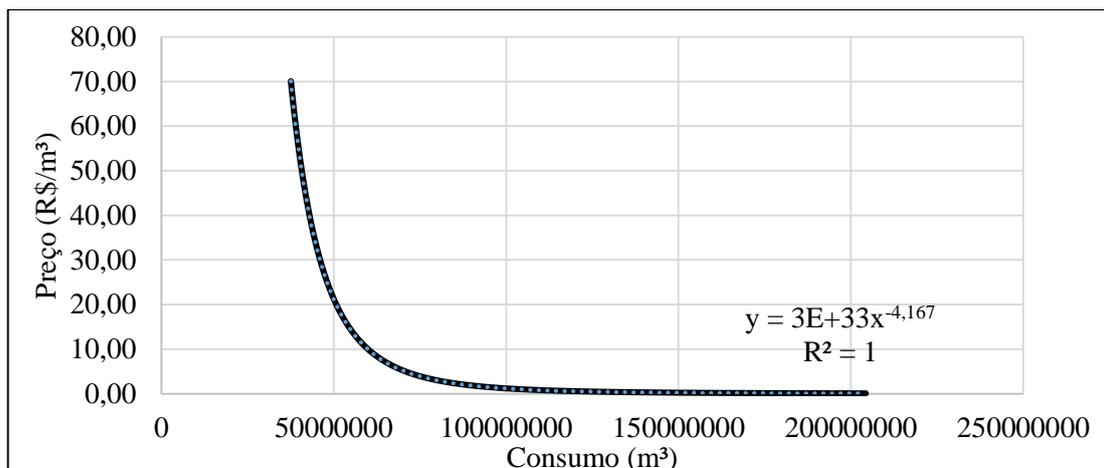


Figura 34. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a $-0,32$ ($\epsilon = -0,32$).

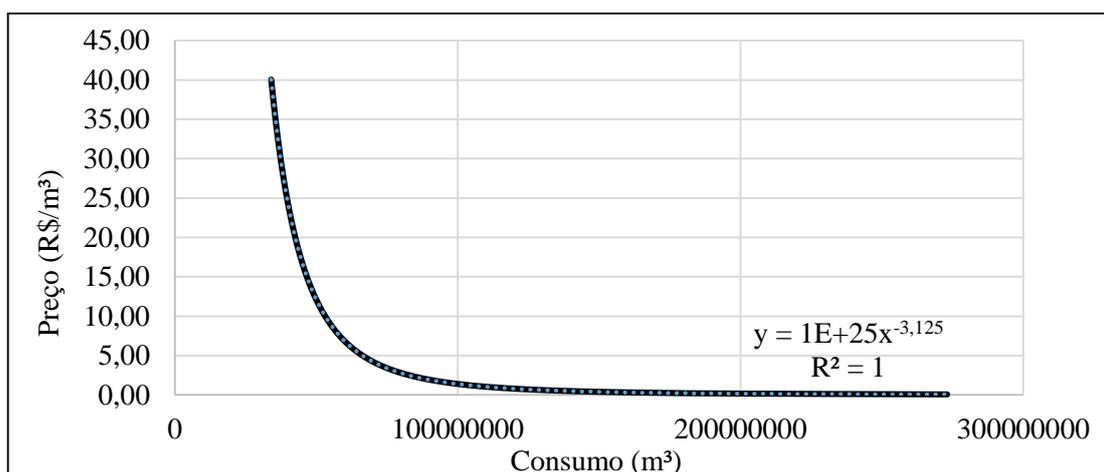


Figura 35. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a $-0,405$ ($\epsilon = -0,405$).

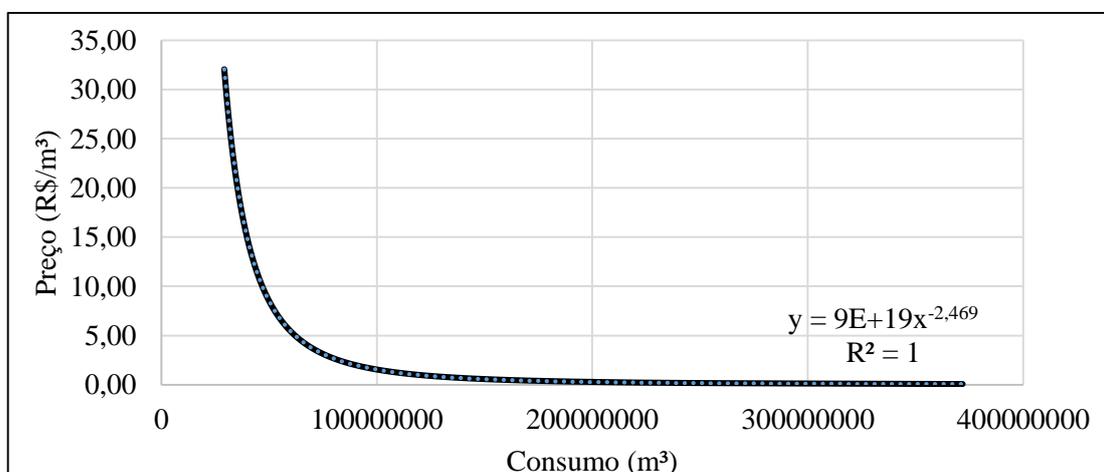


Figura 36. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a $-0,46$ ($\epsilon = -0,46$).

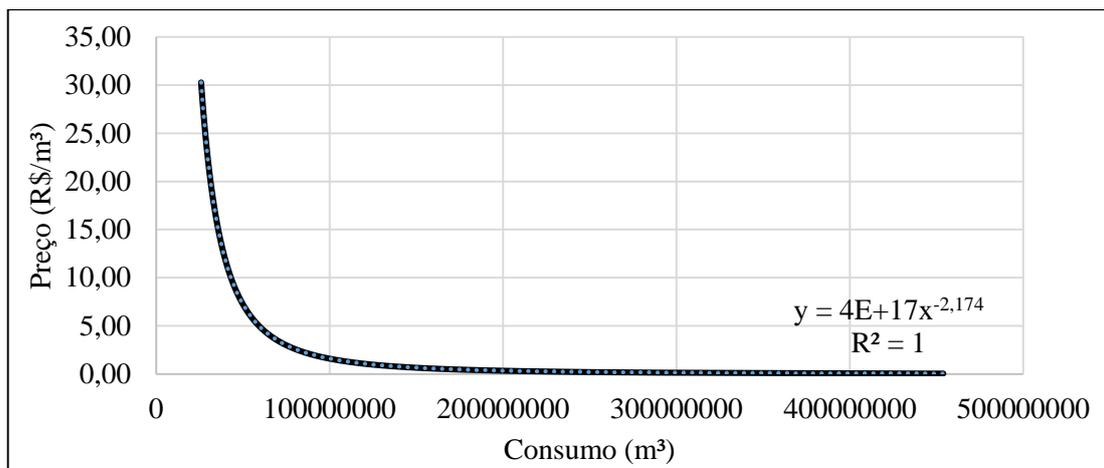
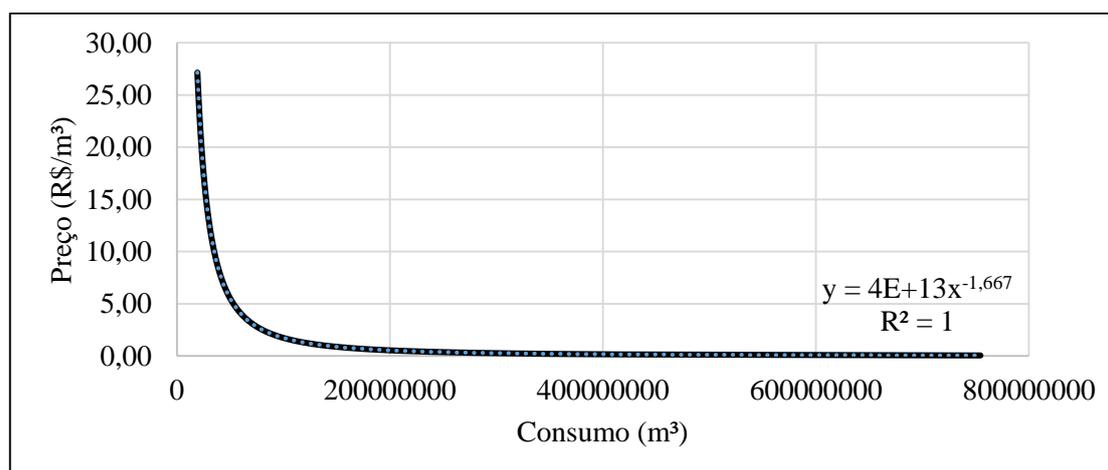


Figura 37. Curva de benefícios marginais (disponibilidade a pagar) de comportamento logarítmico obtida para a elasticidade-preço da demanda igual a $-0,60$ ($\epsilon = -0,60$).



Obtidas as curvas de disponibilidade a pagar, realizou-se a integração de cada uma delas para obter a equação do custo da escassez. Para tal foi considerado como custo zero a situação em que o consumo de água era 20% maior do que aquele do ponto de entrada (W); e foi definido como limite inferior para análise o ponto em que o consumo era 50% menor do que aquele do ponto de entrada (W) utilizado para traçar a curva de disponibilidade a pagar, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11. Limites estipulados para integração da curva de disponibilidade a pagar para cada um dos valores de elasticidade-preço da demanda considerados.

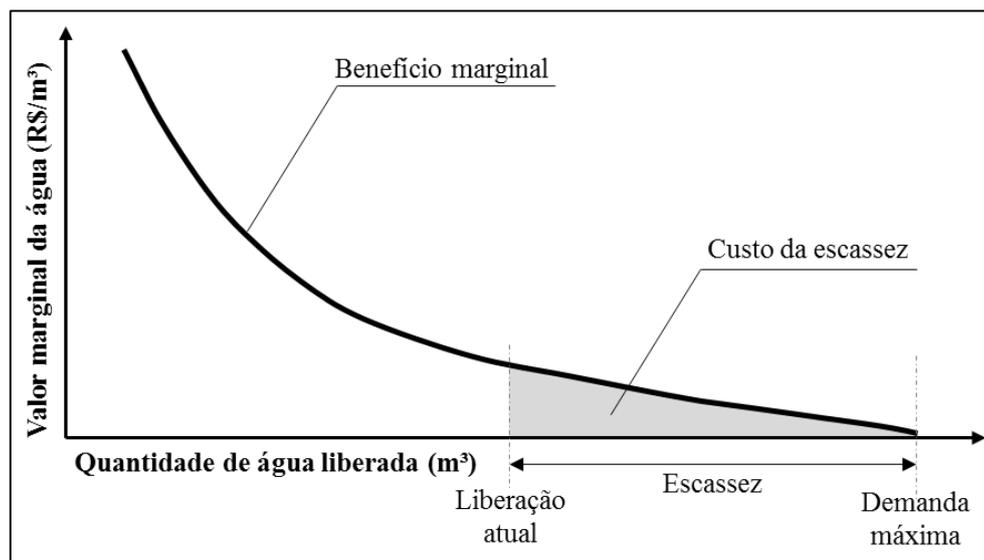
Elasticidade-preço da demanda (ϵ)	Constante arbitrária (k)	Limite superior para integração (custo da escassez nulo)		Limite inferior para integração	
		Quantidade de água (m^3)	Preço (R\$/ m^3)	Quantidade de água (m^3)	Preço (R\$/ m^3)
-0,24	104024338,4	102643200	1,06	42768000	40,59
-0,32	111035956,4	102643200	1,28	42768000	19,72
-0,405	119004355,0	102643200	1,44	42768000	12,51
-0,46	124462585,7	102643200	1,52	42768000	10,20
-0,60	139512782,5	102643200	1,67	42768000	7,17

Segundo notícia divulgada pelo Jornal O Globo em 17 de outubro de 2014 (DANTAS, 2014), com o aumento no número de casos de falta d'água decorrentes da crise hídrica, os moradores da Região Metropolitana de São Paulo passaram a pagar pelo menos 50% a mais pelos serviços de caminhões-pipa; de acordo com uma reportagem do Jornal Estado de São Paulo, divulgada em 16 de outubro de 2014, esse aumento chegou até 275% (RESK, 2014). O Jornal O Globo realizou cotações com seis empresas que distribuem água com caminhão-pipa e verificou que 15 mil litros de água estavam custando entre R\$ 450 e R\$ 1,2 mil (DANTAS, 2014), ou seja, preços variando de R\$ 30/ m^3 a R\$ 80/ m^3 . Sendo assim, é plausível considerar valores como R\$ 40,59/ m^3 como limite de integração para a análise do custo da escassez.

Ademais, considerou-se que mesmo quando a demanda de 33 m^3/s é atendida, ainda há um custo da escassez, indicando que para valores mais baixos da tarifa o consumo ainda pode aumentar, uma vez que usuários podem deixar de adotar medidas de conservação de água que eventualmente resultam em custos adicionais. O custo da escassez se refere a esses custos.

Ao integrar as curvas de disponibilidade a pagar nos intervalos supracitados, obteve-se as equações para descrever o custo da escassez, conforme ilustrado na Figura 38 a seguir.

Figura 38. Curva de benefício marginal (ou disponibilidade a pagar) e custo da escassez.



Fonte: adaptado de Marques et al. (2006).

Obtidas as equações para o cálculo do custo da escassez a partir do valor da quantidade de água liberada para atendimento da demanda (w), inseriu-se estas equações na rotina do Microsoft Excel, de modo a calcular o custo da escassez para cada período analisado, o qual, no trabalho em questão corresponde ao intervalo de um mês.

Depois de calculado o custo da escassez para cada período analisado, realizou-se a soma de todos esses valores em uma única célula. Para encontrar o fator de *hedging* ótimo para minimizar o custo da escassez total utilizou-se a ferramenta *solver* do Microsoft Excel, definindo como objetivo a minimização do valor da célula contendo a soma total dos custos da escassez e definindo como variável a célula contendo o fator de *hedging*; o qual foi inicialmente definido como sendo igual a zero, de modo que até a aplicação do *solver* o modelo apresentava comportamento de acordo com a política padrão de operação (SOP).

Durante a execução do trabalho verificou-se uma limitação da ferramenta *solver*, a qual estava retornando um valor ótimo local para o fator de *hedging*. Para contornar este problema, foram realizadas simulações para vários fatores de *hedging* e, a partir dos resultados destas simulações, verificou-se o fator de *hedging* que apresentava o menor valor para o custo da escassez para cada um dos valores de elasticidade-preço da demanda considerados. Esses valores, bem como os valores imediatamente inferior e superior, foram então inseridos como solução inicial para a otimização utilizando o aplicativo *solver*, considerando a possibilidade de o fator de *hedging* ótimo estar entre os fatores de *hedging*

imediatamente superior e inferior àquele encontrado nas simulações como sendo o que apresentou menor custo da escassez.

Para análise do método também se verificou a soma dos quadrados dos déficits, conforme orientado na literatura, haja vista que a utilização do *hedging* só se justifica se os usos da água tiverem funções de perdas não lineares; de forma a penalizar os déficits de maiores magnitudes. E além disso, realizou-se o cálculo da confiabilidade do sistema para cada política de *hedging* analisada, a qual foi definida conforme a Equação 24 e a Equação 25, onde foi definido que sempre que o sistema não atendesse completamente a demanda alvo, era computada uma falha.

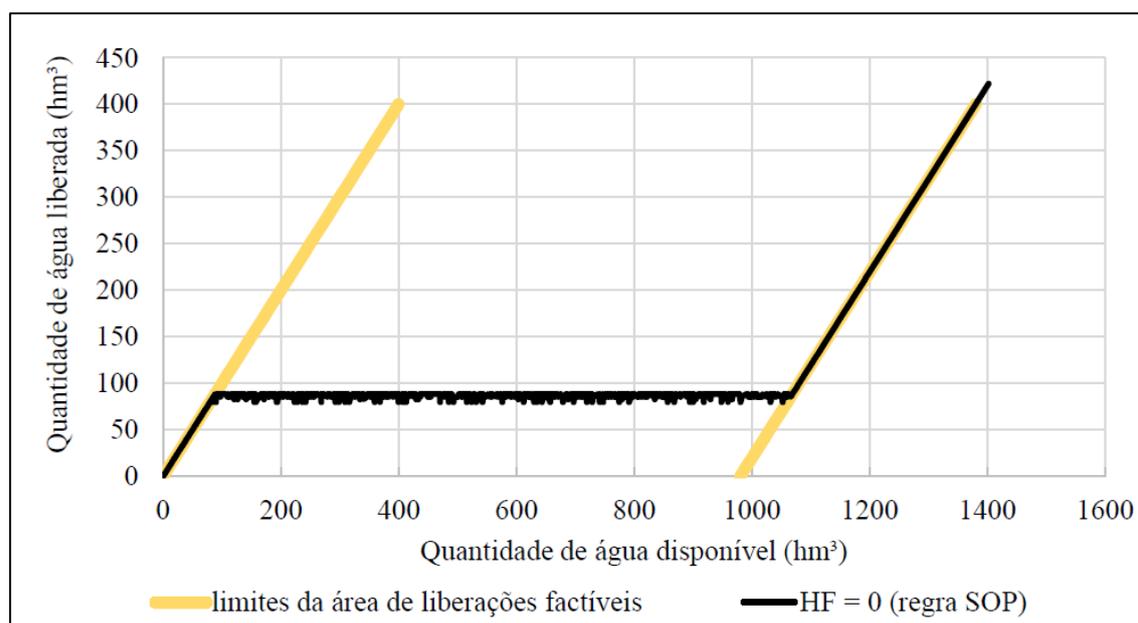
$$\text{Confiabilidade} = 1 - \text{probabilidade de falha} \quad \text{Equação 24}$$

$$\text{Probabilidade de falha} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de períodos com falhas}}{\text{n}^\circ \text{ total de períodos}} \quad \text{Equação 25}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visto que o modelo de simulação foi rodado inicialmente para um fator de *hedging* igual a zero, o primeiro resultado do trabalho foi a regra padrão de operação (SOP – *Standard Operation Policy*) para o Sistema Produtor de Água Cantareira. O resultado se comportou exatamente como o esperado, pois esta política de operação determina que sempre seja liberada a água disponível para atender à demanda presente, de modo que só haverá armazenamento para usos futuros quando houver água excedente após o total atendimento das demandas. Este armazenamento da água excedente ocorrerá até que seja atingida a capacidade máxima do reservatório, de modo que a partir deste ponto, a água que não é liberada para atendimento das demandas e não consegue ser armazenada no reservatório, é vertida. Essa regra busca atender a demanda presente, sem consideração das demandas futuras. O gráfico obtido a partir da regra SOP (HF = 0) é exibido na Figura 39 a seguir.

Figura 39. Representação gráfica dos valores de quantidade de água liberada em função da disponibilidade hídrica, privilegiando os usos presentes da água (regra SOP, fator de *hedging* nulo).

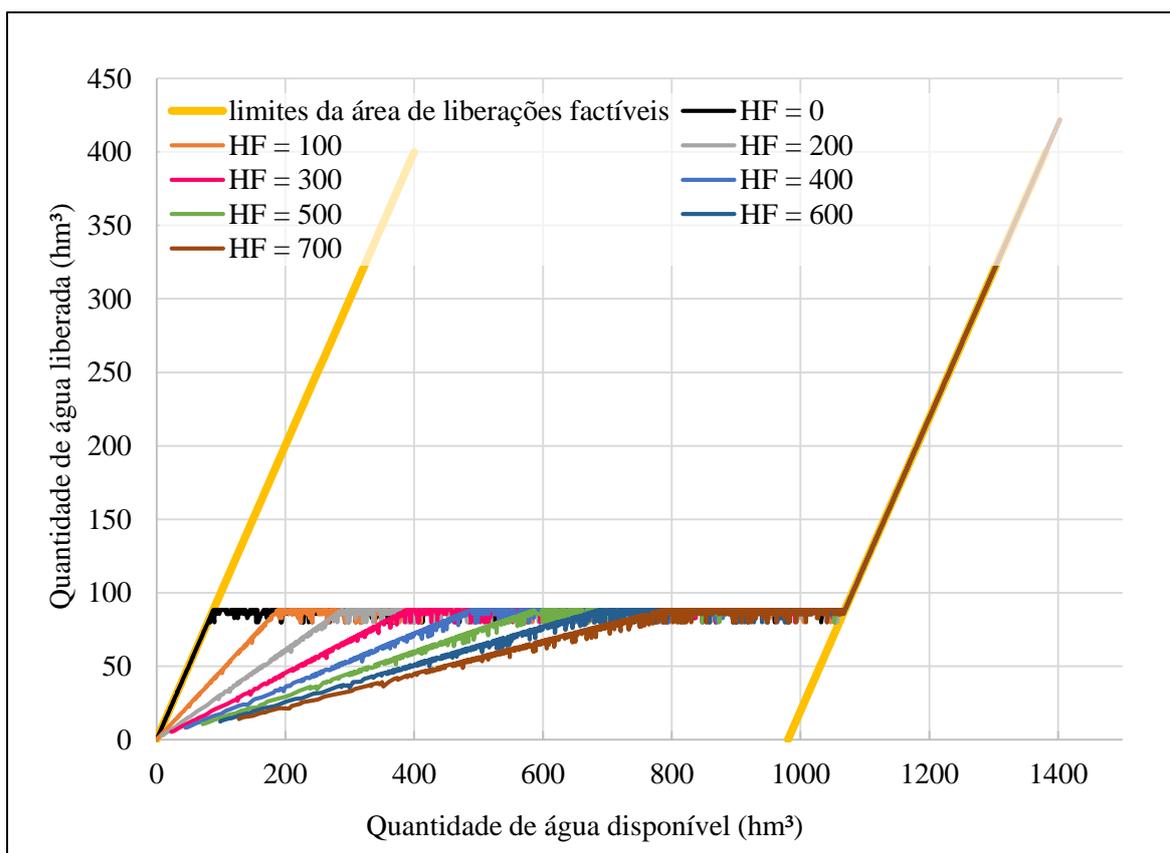


Ressalta-se que as flutuações apresentadas na regra de liberação se devem ao fato de que a simulação foi realizada para intervalos de um mês, cada um deles com a sua respectiva quantidade de dias; de modo que, por a demanda ser fixada em 33 m³/s, a quantidade de água demandada por mês varia, haja vista que alguns meses tem mais dias e, conseqüentemente, mais segundos do que outros. Ou seja, mesmo a demanda sendo fixa quando apresentada em

metros cúbicos por segundo, quando utilizada em hectômetros cúbicos por mês ocorre uma ligeira variação em função da quantidade de dias do mês.

Para verificar a aplicação do modelo para políticas de operação de *hedging*, variou-se o fator de *hedging* para analisar como seria o comportamento da liberação de água em função da disponibilidade hídrica. Foram utilizados para esta análise os fatores de *hedging* (HF – *hedging factor*) com valores de 100, 200, 300, 400, 500, 600 e 700; de modo que os resultados foram plotados juntamente com aqueles obtidos para a regra SOP (HF = 0), conforme pode ser visualizado na Figura 40 a seguir. Lembrando, quanto maior o fator de *hedging*, maior a salvaguarda de armazenamento criada para o futuro. Isso significa que, quanto maior o fator de *hedging*, menor será a quantidade de água liberada para atender às demandas presentes. Porém maior será a quantidade de água poupada no reservatório para atender às demandas futuras e menor será a probabilidade de déficits significativos no futuro.

Figura 40. Representação gráfica dos valores de quantidade de água liberada em função da disponibilidade hídrica para diferentes fatores de *hedging* (HF).



Em outros termos, um fator de *hedging* igual a 100 (para uma demanda de 33 m³/s) significa que a disponibilidade hídrica será reduzida de modo a ser 46,10% da disponibilidade original (considerando um mês de 30 dias). A Tabela 12 a seguir apresenta

como variam as reduções das disponibilidades hídricas para cada fator de *hedging* dependendo da quantidade de dias do mês.

Tabela 12. Redução da disponibilidade hídrica em função da quantidade de dias do mês.

Fator de Hedging (HF)	Mês com 28 dias	Mês com 29 dias	Mês com 30 dias	Mês com 31 dias
100	44,39%	45,26%	46,10%	46,92%
200	28,53%	29,25%	29,96%	30,65%
300	21,02%	21,61%	22,19%	22,76%
400	16,64%	17,13%	17,62%	18,10%
500	13,77%	14,19%	14,61%	15,02%
600	11,74%	12,11%	12,48%	12,84%
700	10,24%	10,56%	10,89%	11,21%

Para cumprir com o objetivo do presente trabalho – encontrar o fator de *hedging* ótimo –, foi necessário estabelecer um critério de avaliação do desempenho do fator de *hedging* na minimização do risco e das perdas econômicas. Para tal, foram desenvolvidas equações de custo da escassez a partir da integração de curvas benefício marginal geradas para diferentes valores de elasticidade-preço da demanda por água. A partir das equações de custo da escassez obtidas, foi possível analisar a eficiência da aplicação do *hedging* como medida de redução de perdas e minimização do risco.

Ao integrar as curvas de disponibilidade a pagar, obteve-se as seguintes equações para descrever o custo da escassez (Tabela 13).

Tabela 13. Equações obtidas para o cálculo do custo da escassez para cada um dos valores de elasticidade-preço da demanda considerados.

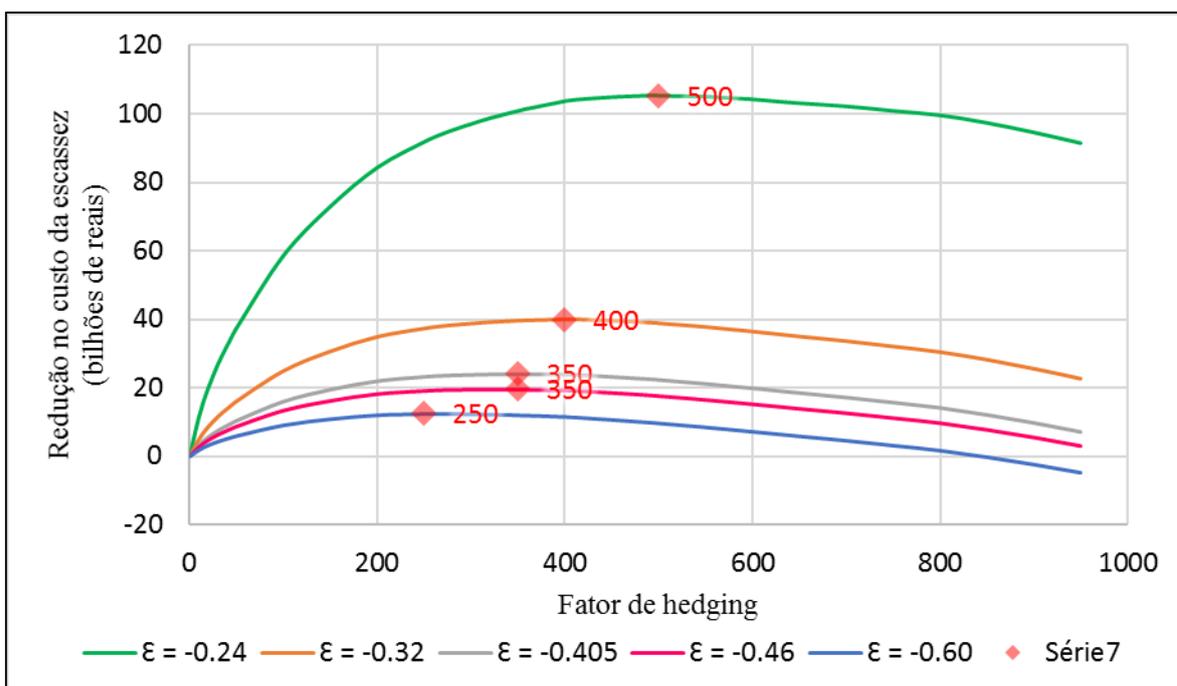
Elasticidade-preço da demanda (ϵ)	Equação da curva de disponibilidade a pagar	Equação do custo da escassez (CE)
-0,24	$\ln w = -0,24 \cdot \ln p + \ln 104024338,4$	$CE = 1,052 \cdot 10^{10} \cdot \exp(-7,057 \cdot 10^{-8} \cdot w)$
-0,32	$\ln w = -0,32 \cdot \ln p + \ln 111035956,4$	$CE = 4,501 \cdot 10^9 \cdot \exp(-5,940 \cdot 10^{-8} \cdot w)$
-0,405	$\ln w = -0,405 \cdot \ln p + \ln 119004355,0$	$CE = 2,982 \cdot 10^9 \cdot \exp(-5,447 \cdot 10^{-8} \cdot w)$

Elasticidade-preço da demanda (ϵ)	Equação da curva de disponibilidade a pagar	Equação do custo da escassez (CE)
-0,46	$\ln w = -0,46 \cdot \ln p$ $+ \ln 124462585,7$	$CE = 2,530 \cdot 10^9 \cdot \exp(-5,259 \cdot 10^{-8} \cdot w)$
-0,60	$\ln w = -0,60 \cdot \ln p$ $+ \ln 139512782,5$	$CE = 1,822 \cdot 10^9 \cdot \exp(-4,768 \cdot 10^{-8} \cdot w)$

Obtidas as equações de custo da escassez, realizou-se a aplicação destas ao modelo de forma que, para encontrar o fator de *hedging* ótimo. Para tal, foram realizadas simulações para vários fatores de *hedging* (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, e 950) e também para a regra SOP (HF = 0), calculando os respectivos custos da escassez da água com as equações geradas para os cinco valores de elasticidade considerados.

A partir destas simulações foi possível calcular a redução obtida no custo da escassez com a aplicação das políticas de *hedging* de um ponto em comparação com àquela obtida para a SOP. Os resultados encontrados são exibidos na Figura 41 a seguir.

Figura 41. Reduções no custo da escassez da água obtidas para os diferentes fatores de *hedging* em comparação com a regra SOP.



Localizados os fatores de *hedging* que apresentaram a maior redução no custo da escassez em comparação com a política padrão de operação, utilizou-se o este valor e também o valor imediatamente inferior a estes como valores iniciais do fator de *hedging* para utilização da ferramenta *solver* do Microsoft Excel, definindo a minimização do valor referente ao somatório do custo da escassez para todos os períodos analisados como objetivo e o fator de *hedging* como variável.

Cabe lembrar que estes valores referentes aos fatores de *hedging* nas imediações daqueles que apresentaram a maior redução no custo da escassez, em relação aos demais fatores de *hedging* analisados, quando cotejado com a regra SOP, foram definidos como valores iniciais para a aplicação do *solver* por conta de que, por uma limitação do algoritmo utilizado por este aplicativo do MS Excel, o mesmo estava retornando um valor ótimo local quando iniciado com o HF igual a zero, e, por esse motivo, foi preciso alterar o valor de partida para um valor mais próximo do fator de *hedging* ótimo a ser encontrado, considerando a possibilidade de o fator de *hedging* ótimo estar entre os fatores de *hedging* imediatamente superior e inferior àquele encontrado nas simulações como sendo o que apresentou menor custo da escassez.

Como foram geradas diversas equações para o custo da escassez, cada uma delas referente a um valor diferente de elasticidade – haja vista que não foi possível obter um valor específico de elasticidade-preço da demanda por água para o abastecimento urbano como um todo para área de estudo –, foram encontrados também diferentes valores de fator de *hedging* ótimos.

Os fatores de *hedging* ótimos encontrados (vide Figura 42) são explicitados na Tabela 14 juntamente com o valor de elasticidade considerado para sua obtenção e respectivo custo da escassez em milhões de reais. Para fins de comparação, a Tabela 14 exhibe também os valores de custo da escassez da água calculados com a utilização de cada um dos cinco valores de elasticidade para o caso de uma política de operação sem *hedging*, isto é, para a política padrão de operação (SOP), onde o custo da escassez é referente ao período total analisado (série temporal de 86 anos, com 1032 intervalos de um mês).

Figura 42. Reduções no custo da escassez da água obtidas para os diferentes fatores de *hedging* em comparação com a regra SOP e fatores de *hedging* ótimos.

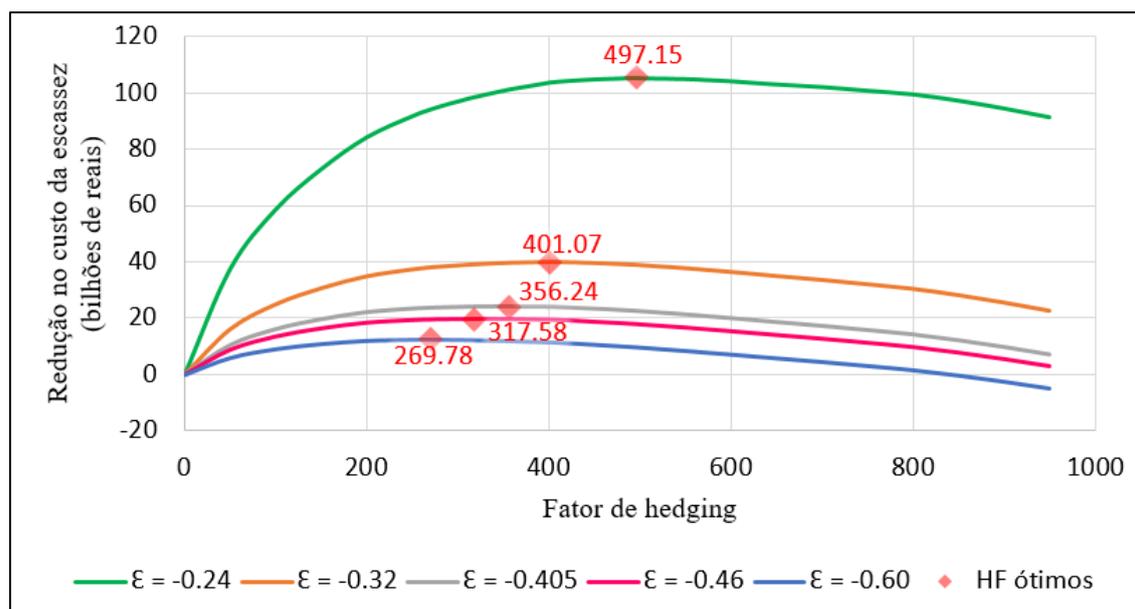


Tabela 14. Fatores de *hedging* ótimos encontrados para cada valor de elasticidade-preço da demanda considerados e respectivo custo da escassez calculado.

Elasticidade-preço da demanda (ϵ)	Fator de <i>hedging</i> (HF) ótimo	Custo da escassez total (bilhões de reais)		Redução no custo da escassez alcançada com o <i>hedging</i>
		<i>Hedging</i>	SOP	
-0,24	497,15	135,63	241,01	43,72%
-0,32	401,07	95,18	135,07	29,53%
-0,405	356,24	80,20	104,25	23,07%
-0,46	317,58	74,74	94,30	20,75%
-0,60	269,78	69,50	81,94	15,18%

Conforme pode ser observado na Tabela 14, quanto maior o valor da elasticidade-preço da demanda por água considerado, em termos absolutos, menor é o fator de *hedging* ótimo encontrado e menor é o custo da escassez, tanto para a regra padrão de operação quando para a regra com *hedging*, mas com menor diferença entre esses dois valores (menor redução percentual no custo da escassez com a aplicação do *hedging*).

Tal comportamento se deve à influência da variável elasticidade-preço da demanda no comportamento da curva de benefício marginal gerada a partir da Equação 22, de modo que,

quanto menor for o módulo da elasticidade, para uma dada variação no volume de água liberado, maior será a variação no preço (Figura 43). E quanto menor for a elasticidade em termos absolutos, maior será a curvatura da função que descreve o custo da escassez, de modo que, para um determinado volume de água abaixo do completo atendimento da demanda, maior será o custo da escassez associado (Figura 44).

Em termos econômicos, esse resultado indica que, para menores valores da elasticidade em módulo, uma mesma alteração no preço (ou no custo da escassez) é causada por uma menor alteração na quantidade de água fornecida. Nessas condições, um grande racionamento de água em um ano crítico terá um impacto econômico (custo da escassez) proporcionalmente maior se comparado com uma situação com maior elasticidade (em termos absolutos). É por isso que as estratégias de *hedging* se mostraram particularmente vantajosas para baixos valores de elasticidade, em termos absolutos (Tabela 14), com maiores reduções nos custos da escassez.

Figura 43. Curvas de benefício marginal geradas para os diferentes valores de elasticidade.

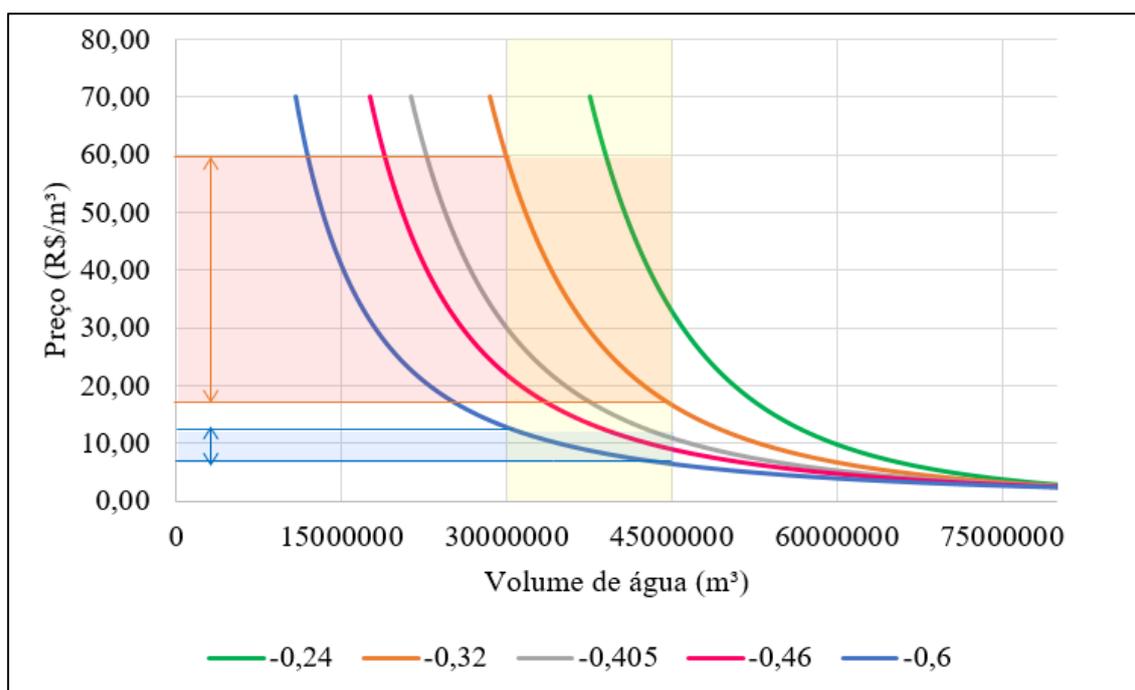
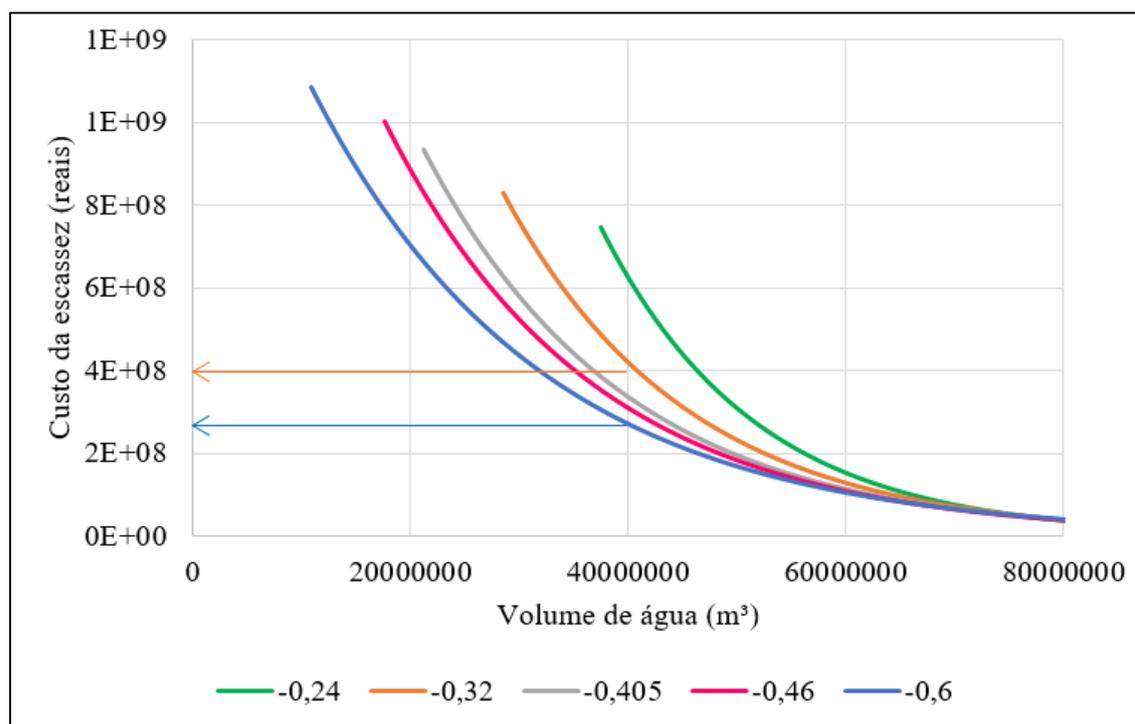


Figura 44. Curvas de custo da escassez geradas para os diferentes valores de elasticidade.

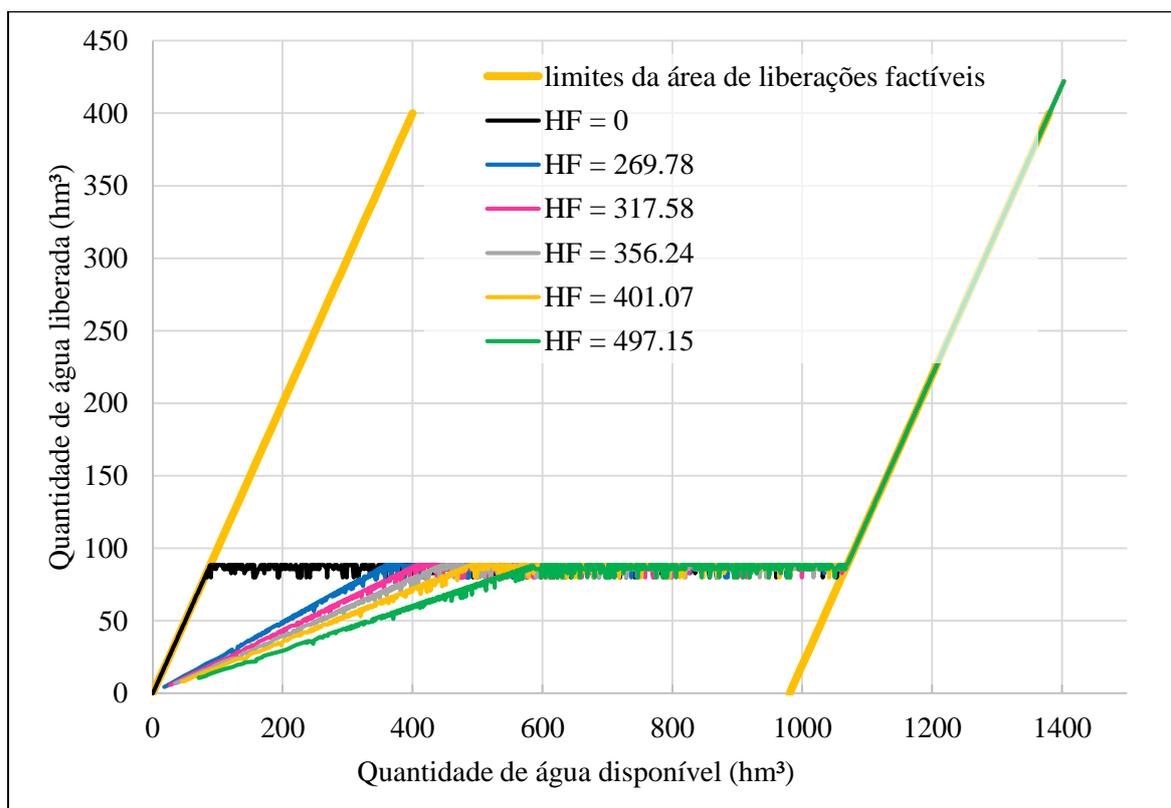


Conforme pode ser observado na Tabela 14, independentemente de qual foi o valor considerado para a elasticidade-preço da demanda, a regra de operação envolvendo o *hedging* apresentou custo da escassez da água menor do que aquele obtido na simulação da regra padrão de operação. Tal resposta já era esperada, visto que, este custo da escassez calculado a partir da simulação com *hedging* apresentado na Tabela 14 é referente ao fator de *hedging* ótimo para cada valor de elasticidade; e caso a regra SOP fosse a melhor opção, quando da realização da otimização com o uso do *solver*, minimizando o custo da escassez total tendo como variável o fator de *hedging*, esta otimização resultaria que o fator de *hedging* ótimo seria igual a zero, o que configura a regra padrão de operação (SOP, HF = 0).

A redução no custo da escassez quando da aplicação das políticas de *hedging* em comparação com a SOP, variou de 15,2% (para $\epsilon = -0,60$) até 43,7% (para $\epsilon = -0,24$), quando analisados os resultados obtidos a partir da simulação com os fatores de *hedging* ótimos.

Obtidos os valores ótimos para o fator de *hedging*, simulou-se o comportamento das liberações em função da disponibilidade hídrica para cada um destes fatores de *hedging* (HF = 497,15; HF = 401,07; HF = 356,24; HF = 317,58; e HF = 269,78), bem como para a regra padrão de operação (HF = 0), conforme explicitado na Figura 45 a seguir.

Figura 45. Quantidade de água liberada em função da disponibilidade hídrica para os fatores de *hedging* (HF) ótimos obtidos para cada valor de elasticidade considerados.



Em outros termos, um fator de *hedging* igual a 356,24 (para uma demanda de 33 m³/s) significa que a disponibilidade hídrica será reduzida de modo a ser 18,34% da disponibilidade original (considerando um mês de 30 dias).

A Tabela 15 a seguir apresenta a forma como variam as reduções das disponibilidades hídricas para cada fator de *hedging* ótimo encontrado dependendo da quantidade de dias do mês, lembrando que foram encontrados cinco valores de *hedging* ótimos por conta de terem sido utilizados cinco valores diferentes de elasticidade-preço da demanda e, conseqüentemente, de terem sido geradas cinco equações diferentes para descrever o custo da escassez.

Tabela 15. Redução da disponibilidade hídrica em função da quantidade de dias do mês.

Fator de Hedging (HF)	Mês com 28 dias	Mês com 29 dias	Mês com 30 dias	Mês com 31 dias
269,78	22,83%	23,46%	24,07%	24,68%
401,07	20,09%	20,66%	21,22%	21,77%
356,24	18,31%	18,84%	19,36%	19,88%
401,07	16,60%	17,09%	17,58%	18,06%
497,15	13,84%	14,26%	14,68%	15,10%

Como é possível observar na Tabela 15, quanto maior o fator de *hedging* considerado, menor será a quantidade de água disponibilizada para atendimento das demandas e, conseqüentemente, maior será a quantidade de água armazenada no sistema de reservatórios para possíveis usos futuros em detrimento de sua liberação para benefício imediato.

Outra forma de verificar o desempenho do sistema de reservatórios com a aplicação das políticas de *hedging* envolve o cálculo da soma dos quadrados dos déficits, da probabilidade de falha e da confiabilidade do sistema para os diferentes fatores de *hedging* considerados. Estes valores são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Parâmetros de verificação do desempenho do sistema de reservatórios com a aplicação de diferentes fatores de *hedging*.

Fator de <i>hedging</i>	Soma dos quadrados dos déficits	Probabilidade de falha	Confiabilidade
0,00	323552,22	0,12 = 12%	0,88 = 88%
269,78	304269,92	0,25 = 25%	0,75 = 75%
401,07	311294,18	0,29 = 29%	0,71 = 71%
356,24	317611,49	0,31 = 31%	0,69 = 69%
401,07	325238,49	0,33 = 33%	0,67 = 67%
497,15	347392,93	0,40 = 40%	0,60 = 60%

Conforme pode ser visualizado na Tabela 16, a política padrão de operação é aquela que apresenta a maior confiabilidade, ou seja, é a regra que proporciona que o sistema de reservatórios seja menos susceptível às falhas (maior robustez). Entretanto, deve-se atentar para o fato de que uma alta confiabilidade do sistema se refere apenas à frequência de ocorrência das falhas, mas não reflete a magnitude de tais falhas (vulnerabilidade), nem suas respectivas durações (resiliência).

Desta forma, como esperado, as regras de operação simuladas considerando as políticas de *hedging* apresentaram uma probabilidade de falha maior do que aquela desenvolvida em conformidade com a regra SOP. Tal resultado já era previsto por conta de que as políticas de *hedging* consistem basicamente em reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas mais severas ao custo de falhas menores e mais frequentes. Então, dado que a confiabilidade se refere à frequência da ocorrência de falhas (independentemente da sua magnitude), é de se esperar que a aplicação de políticas de *hedging* para a operação de um sistema de reservatórios, resulte em um sistema com menor confiabilidade.

Tendo em vista que, segundo Neelakantan e Pundarikanthan (1998), para avaliar a aplicabilidade de políticas de *hedging* devem ser analisados parâmetros de desempenho como a soma dos quadrados dos déficits – uma vez que, em as funções de perdas não sendo lineares, os déficits maiores são penalizados mais do que proporcionalmente do que os déficits menores – foram analisados os valores referentes à soma dos quadrados dos déficits, tanto para a simulação realizada com a aplicação da regra SOP como para as simulações realizadas com aplicação de regras com *hedging* (Tabela 16).

Para a simulação aplicando as políticas de *hedging*, utilizou-se os fatores de *hedging* ótimos encontrados para cada um dos cinco valores de elasticidade-preço da demanda considerados. Porém, conforme pode ser visualizado na Tabela 16, o parâmetro de desempenho “soma dos quadrados dos déficits” não apresentou resultados homogêneos, isto é, dependendo do fator de *hedging* considerado, a soma dos quadrados dos déficits pode ser maior para a regra de operação com *hedging* ou para a regra padrão de operação.

Dado que os fatores de *hedging* analisados foram escolhidos por conta de serem os fatores de *hedging* ótimos para determinados valores de elasticidade-preço da demanda, pode-se concluir que, dependendo do valor da elasticidade, o seu fator de *hedging* ótimo pode apresentar um valor para a soma dos quadrados dos déficits maior do que aquele obtido com a aplicação da regra padrão de operação. Todavia, o fato de o fator de *hedging* ótimo encontrado para um determinado valor de elasticidade resultar em um valor de “soma dos quadrados dos déficits” maior do que aquele obtido com a aplicação da regra SOP, não significa que a política de *hedging* não será vantajosa, pois existem outros parâmetros para analisar os benefícios obtidos com a aplicação da política de *hedging*, como é o caso do custo da escassez, cuja minimização é o objetivo deste estudo.

Caso o presente trabalho não contemplasse o cálculo do custo da escassez, por meio da integração da curva de benefício marginal (disponibilidade a pagar) e, conseqüentemente, não abordasse os valores de elasticidade-preço da demanda, seria possível estimar um fator de *hedging* ótimo a partir da minimização da soma dos quadrados dos déficits. Por isso, para fins de comparação dos resultados, foi verificado também qual seria o fator de *hedging* que apresentaria o menor valor de soma dos quadrados dos déficits, por meio da utilização da ferramenta *solver* do Microsoft Excel, tendo a minimização da soma dos quadrados dos déficits como objetivo, e definindo o fator de *hedging* como variável.

Desta forma, foi encontrado que o fator de *hedging* que apresentou menor valor para a soma dos quadrados dos déficits foi $HF = 164,58$. No entanto, ao levar em consideração as equações de custo da escassez, este fator de *hedging* apresentou um custo de escassez de água maior do que aqueles obtidos para os demais fatores de *hedging* apresentados na Tabela 17. Além disso, para este fator de *hedging*, o sistema apresentou confiabilidade de 80% (probabilidade de falha igual a 20%).

Tabela 17. Custo da escassez calculado para cada valor de elasticidade considerado para o fator de *hedging* que apresentou menor soma dos quadrados dos déficits.

Elasticidade-preço da demanda (ϵ)	Custo da escassez (bilhões de reais)	Fator de <i>hedging</i> (HF)
-0,24	164,15	
-0,32	103,02	
-0,405	83,79	164,58
-0,46	77,30	
-0,60	70,57	

Para fins de comparação e análise dos resultados obtidos com a aplicação das políticas de *hedging* de um ponto, foi realizada uma nova simulação com vistas à obtenção dos índices de desempenho da atual operação do Sistema Cantareira, haja vista que este não opera de acordo com a regra padrão de operação (SOP), mas sim conforme uma regra própria, a qual é baseada no estado do Sistema Equivalente (reservatórios Jaguari-Jacaré, Cachoeira e Atibainha), em termos do volume de água armazenado em relação ao seu volume útil (vide Tabela 7, página 64).

Para a realização desta nova simulação, foi efetuada uma modificação no modelo de forma a contemplar a regra de operação praticada pela Sabesp no Sistema Cantareira de forma aproximada. Para isso, fez-se uma alteração no disposto na vide Tabela 7 (página 64) de modo a considerar também o reservatório Paiva Castro para verificação do estado do sistema (volume de água armazenado em relação ao seu volume útil) e posterior aplicação da regra supracitada.

Sendo assim, haja vista que o reservatório Paiva Castro contribui com uma vazão de 2 m³/s para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo e dado que a vazão máxima de retirada do Sistema Cantareira para atendimento das demandas é de 33 m³/s (SABESP, 2014), a vazão proveniente do reservatório Paiva Castro deve ser contabilizada para a realização da análise da operação do Sistema Cantareira.

Desta forma, com as alterações realizadas, a regra aplicada para analisar a operação do Sistema Cantareira pela Sabesp de forma aproximada, é apresentada na Tabela 18 a seguir.

Tabela 18. Limites de vazão de retirada em função do estado do Sistema Cantareira (reservatórios Jaguari-Jacareí + Cachoeira + Atibainha + Paiva Castro).

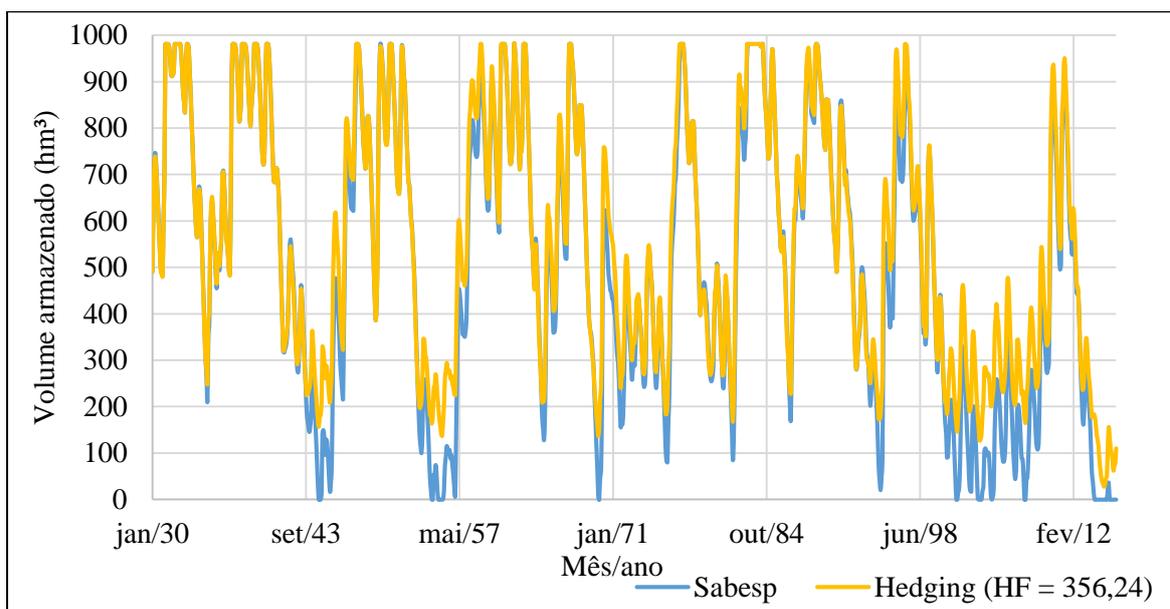
Limite da vazão de retirada (m ³ /s)	Estado do Sistema Cantareira em % do volume útil											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
26,08	16,3	15,7	15,8	15,8	16,6	15,3	12,9	9,9	6,6	3,0	0,0	0,0
26,80	21,4	20,7	20,5	20,4	20,9	19,4	16,7	13,6	10,0	6,3	3,0	2,0
26,95	22,7	21,9	21,7	21,5	22,0	20,4	17,7	14,5	10,9	7,1	3,8	2,5
27,70	29,2	28,1	27,6	27,1	27,4	25,5	22,6	19,1	15,2	11,1	7,5	6,0
28,46	35,6	34,3	33,5	32,7	32,8	30,6	27,4	23,6	19,4	15,1	11,3	9,5
29,22	42,1	40,4	39,4	38,4	38,1	35,7	32,2	28,2	23,7	19,1	15,0	13,0
29,97	48,5	46,6	45,3	44,0	43,5	40,8	37,1	32,8	28,0	23,2	18,8	16,5
30,73	55,0	52,8	51,2	49,7	48,9	45,9	41,9	37,3	32,3	27,2	22,6	20,0
31,48	61,4	59,0	57,1	55,3	54,2	51,0	46,7	41,9	36,6	31,2	26,3	23,5
32,24	67,8	65,2	63,0	60,9	59,6	56,1	51,6	46,4	40,9	35,3	30,1	27,0
33,00	74,3	71,3	68,9	66,6	65,0	61,2	56,4	51,0	45,2	39,3	33,8	30,5

Inseridas as restrições de retiradas para atendimento das demandas no modelo, conforme explicitado na Tabela 18, foi possível realizar a simulação para verificar o comportamento do sistema de reservatórios perante essa nova regra de operação, bem como os índices de desempenho relacionados à esta forma de operação e respectivo custo da escassez associado.

Para fins de comparação entre a política de *hedging* e a política de operação praticada pela Sabesp, optou-se por explicitar os resultados obtidos para o fator de *hedging* igual a 356,24, o qual foi encontrado como ótimo quando utilizado o valor de elasticidade-preço da demanda médio ($\epsilon = -0,405$).

O gráfico apresentado na Figura 46 a seguir ilustra o comportamento da quantidade de água armazenada nos reservatórios para a regra utilizada pela Sabesp e para a regra com *hedging* (com fator de *hedging* de 356,24).

Figura 46. Gráfico do volume de água armazenado no sistema de reservatórios em função do tempo, considerando a operação da Sabesp e a operação com *hedging* (HF = 356,24).



Como pode ser observado na Figura 46, a regra de operação utilizada pela Sabesp apresentou armazenamento igual ou menor que aquele obtido com a utilização da política de *hedging* com fator de *hedging* igual a 356,24 em boa parte dos períodos simulados. Dos 1032 períodos simulados (para os quais foram utilizados a soma das séries de vazões dos cursos d'água a montante de onde estão localizados os reservatórios do Sistema Cantareira – Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro – no período de janeiro de 1930 à dezembro de 2015), 59,79% apresentaram armazenamento no sistema de reservatórios maior para a operação com *hedging* (HF = 356,24); 25,39% apresentaram a mesma quantidade de água armazenada para as duas simulações (Sabesp, vide Tabela 18 e *hedging*, com HF = 356,24); e 14,83% apresentaram armazenamento maior para a simulação da operação da Sabesp.

Além disso, na simulação realizada aplicando a regra de operação da Sabesp, o reservatório chegou ao seu nível mínimo quarenta e duas vezes, de forma que o volume de água armazenado no volume útil do reservatório chegou a zero, enquanto que na simulação com *hedging* (HF = 356,24), o reservatório não esvaziou completamente em nenhum dos 1032 períodos simulados.

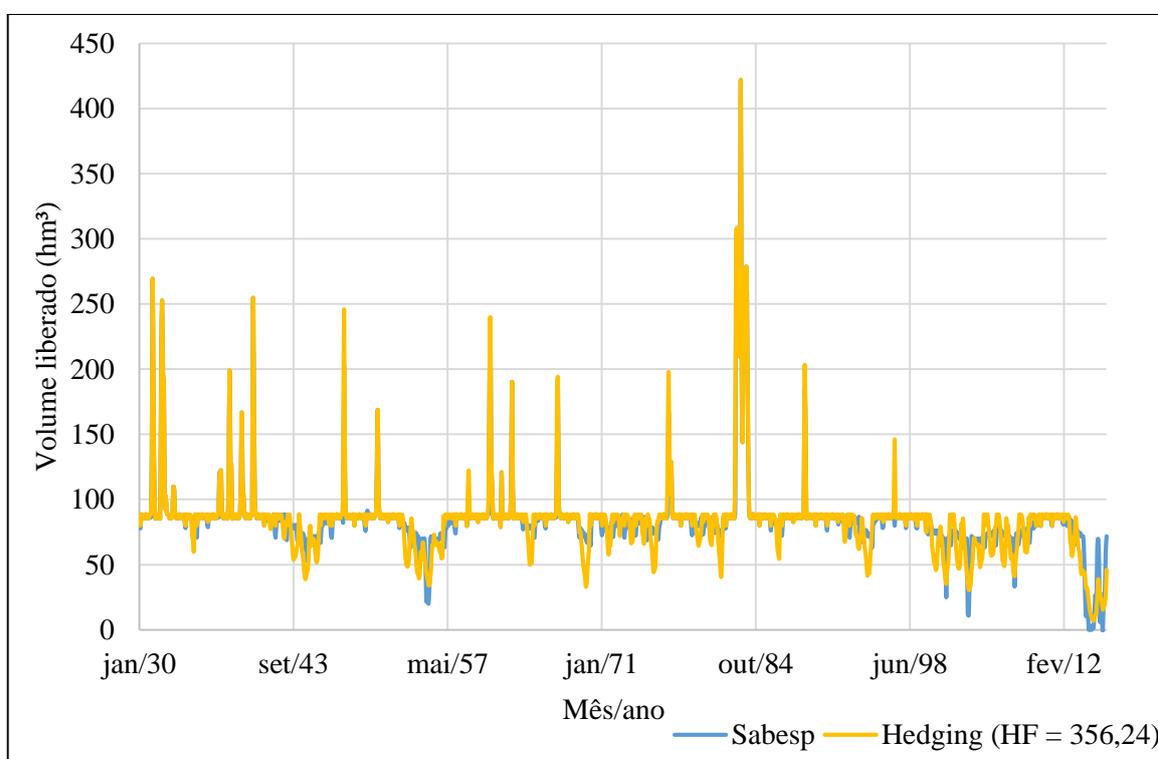
Embora seja importante que o reservatório utilize toda sua capacidade, variando desde o nível d'água máximo até o nível d'água mínimo, pode ser muito arriscado operar dessa forma quando se trata de um reservatório para fins de abastecimento urbano. Isso porque devido às incertezas e imprevisibilidades das pluviosidades, não há como afirmar que haverá uma

precipitação considerável em um período próximo para reencher o reservatório de modo que a sociedade não sofra fortemente com este desabastecimento, especialmente quando o sistema de reservatórios em análise é responsável pela maior parte do abastecimento.

Desta forma, pode-se considerar que a regra de operação com *hedging* ($HF = 356,24$) é mais conservadora e também mais segura em relação aos riscos de completo desabastecimento.

A Figura 47 a seguir apresenta as simulações dos volumes de água liberados para o caso da aplicação da regra de operação e para a política de *hedging* de um ponto, com fator de *hedging* igual a 356,24.

Figura 47. Gráfico do volume de água liberado do sistema de reservatórios em função do tempo, para a operação da Sabesp e a operação com *hedging* ($HF = 356,24$), incluindo vertimentos.



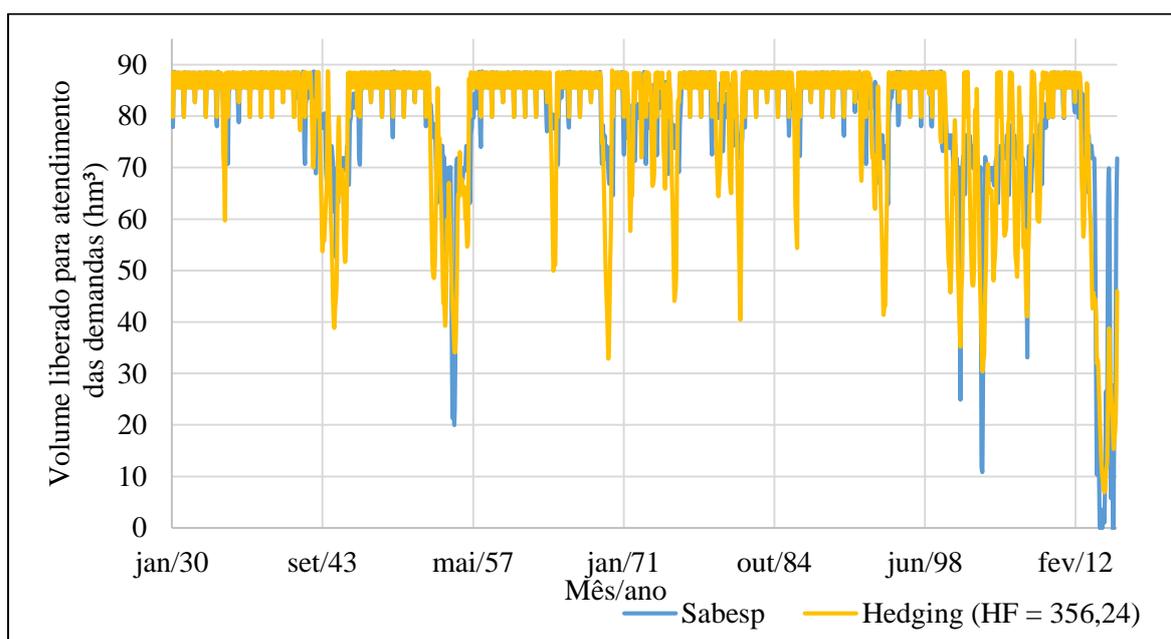
Quanto aos vertimentos, na simulação realizada aplicando a regra de operação da Sabesp, o sistema verteu em sessenta e seis dos 1032 períodos analisados, somando 5219,68 hm^3 ; enquanto que na simulação realizada aplicando a regra com *hedging* ($HF = 356,24$), foram verificados 73 períodos com vertimento, totalizando 5590,70 hm^3 .

Sendo assim, é possível concluir que a regra utilizada pela Sabesp para operação do Sistema Canteira é mais eficiente do que a política de *hedging* de um ponto ($HF = 356,24$) em relação à quantidade de água é perdida pelo vertimento, dado que a água vertida não gera benefícios e nem reduz o custo da escassez. Entretanto, tal resultado era esperado, uma vez que

a operação do reservatório de forma mais conservadora com o *hedging*, vai mantê-lo com níveis de armazenamento maiores e conseqüentemente com um maior risco de vertimento. É o *trade-off* que se paga para reduzir a probabilidade de um desabastecimento completo no futuro.

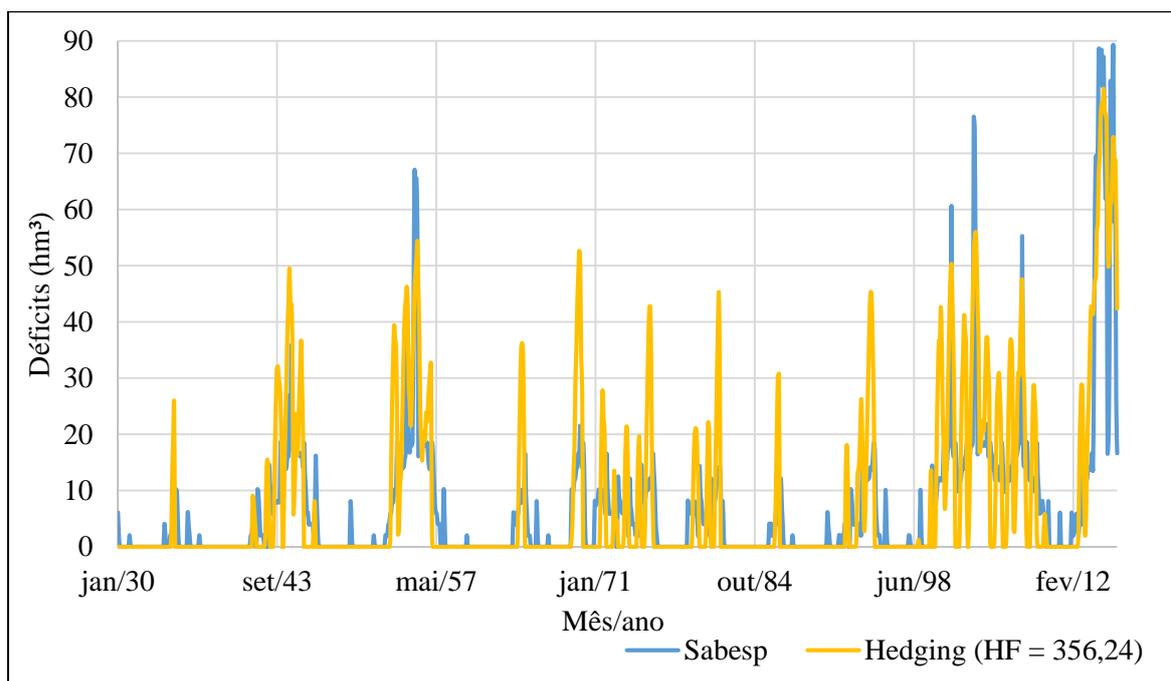
A Figura 48 ilustra o volume de água liberado para atendimento das demandas; desconsiderando-se o volume vertido, uma vez que este não é aproveitado para abastecimento da RMSP e conseqüentemente, não gera benefícios nem minimiza o custo da escassez total.

Figura 48. Gráfico do volume de água liberado para atendimento das demandas em função do tempo, considerando a operação da Sabesp e a operação com *hedging* (HF = 356,24).



Quanto ao atendimento da demanda alvo, vale lembrar que existem flutuações nas liberações, mesmo quando a demanda é plenamente atendida pelo fato de que a demanda alvo foi fixada em 33 m³/s, de forma que seu valor, ao ser convertido para hectômetros cúbicos por mês varia conforme a quantidade de dias do período. Sendo assim, para melhor visualização das falhas e suas respectivas magnitudes, a Figura 49 a seguir apresenta a escassez para cada período de tempo analisado (diferença entre a quantidade de água liberada e a demanda alvo).

Figura 49. Gráfico de escassez em função do tempo, considerando a operação da Sabesp e a operação com *hedging* (HF = 356,24).



Na simulação realizada aplicando a regra de operação da Sabesp, o sistema falhou em atender a demanda em 75,78% dos períodos analisados (confiabilidade de 24,22%); enquanto que na simulação realizada aplicando a regra com *hedging* (HF = 356,24), a demanda não foi atendida em 31,01% dos períodos analisados (confiabilidade de 68,99%).

No entanto, embora a operação da Sabesp tenha apresentado maior frequência de falhas (menor confiabilidade), no que diz respeito à magnitude de tais falhas, aquelas apresentadas na simulação realizada com a política de *hedging* de um ponto foram mais severas. Tal fato pode ser verificado por meio da soma dos quadrados dos déficits, a qual apresentou o valor de 219.067,96 para a simulação da operação da Sabesp e de 317.611,49 para a simulação da regra de *hedging* (HF=356,24), ou seja, a soma dos quadrados dos déficits para a regra de *hedging* foi 44,98% maior do que para a regra da Sabesp.

Este comportamento já era esperado, dado que, como verificado por Moy et al. (1986), conforme a confiabilidade ou a resiliência crescem, cresce também a vulnerabilidade a déficits de grandes magnitudes. Ou seja, uma maior confiabilidade resulta em uma maior vulnerabilidade, isto é, se as falhas são mais frequentes, suas magnitudes são menores, e conseqüentemente, o sistema será menos vulnerável a falhas mais severas.

Figura 50. Escassez e custo da escassez para regra de operação da Sabesp e com *hedging* (HF=356,24).

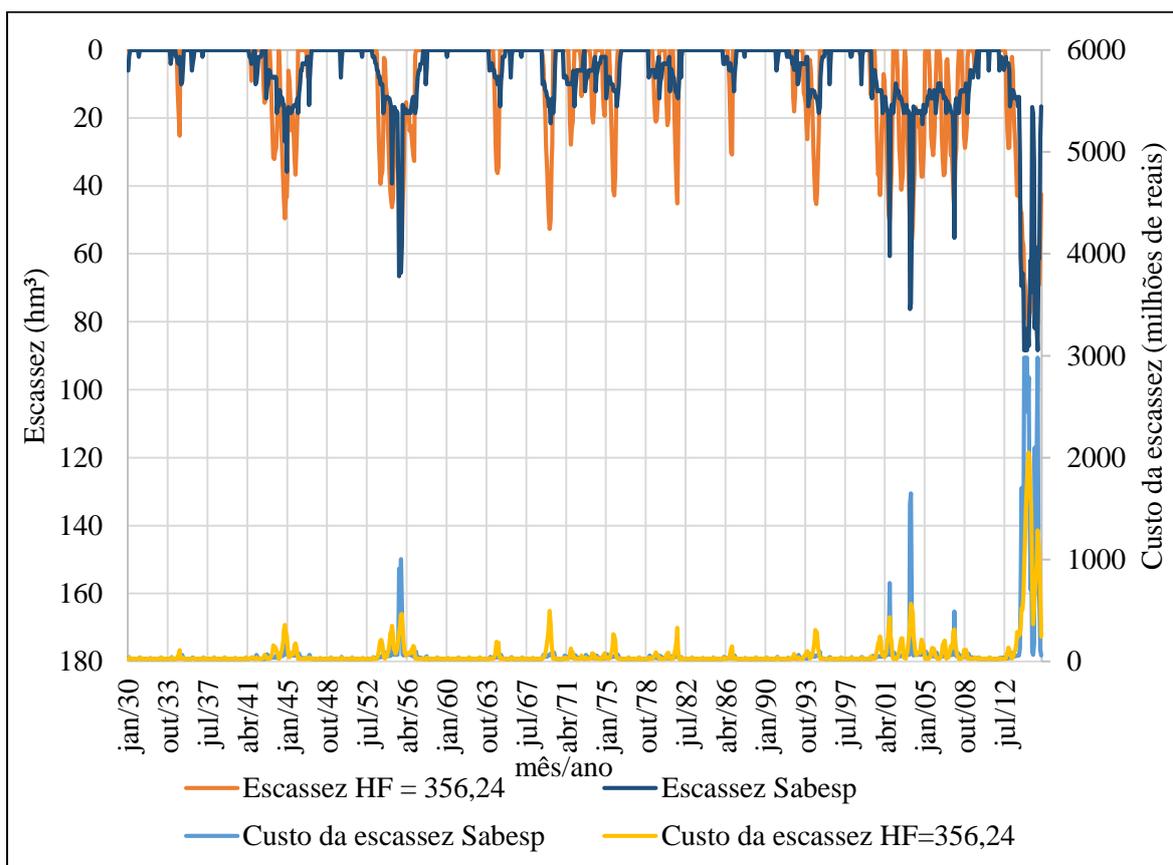


Figura 51. Escassez e custo da escassez nos 36 meses mais críticos da série temporal, para a regra de operação da Sabesp e com *hedging* (HF = 356,24).

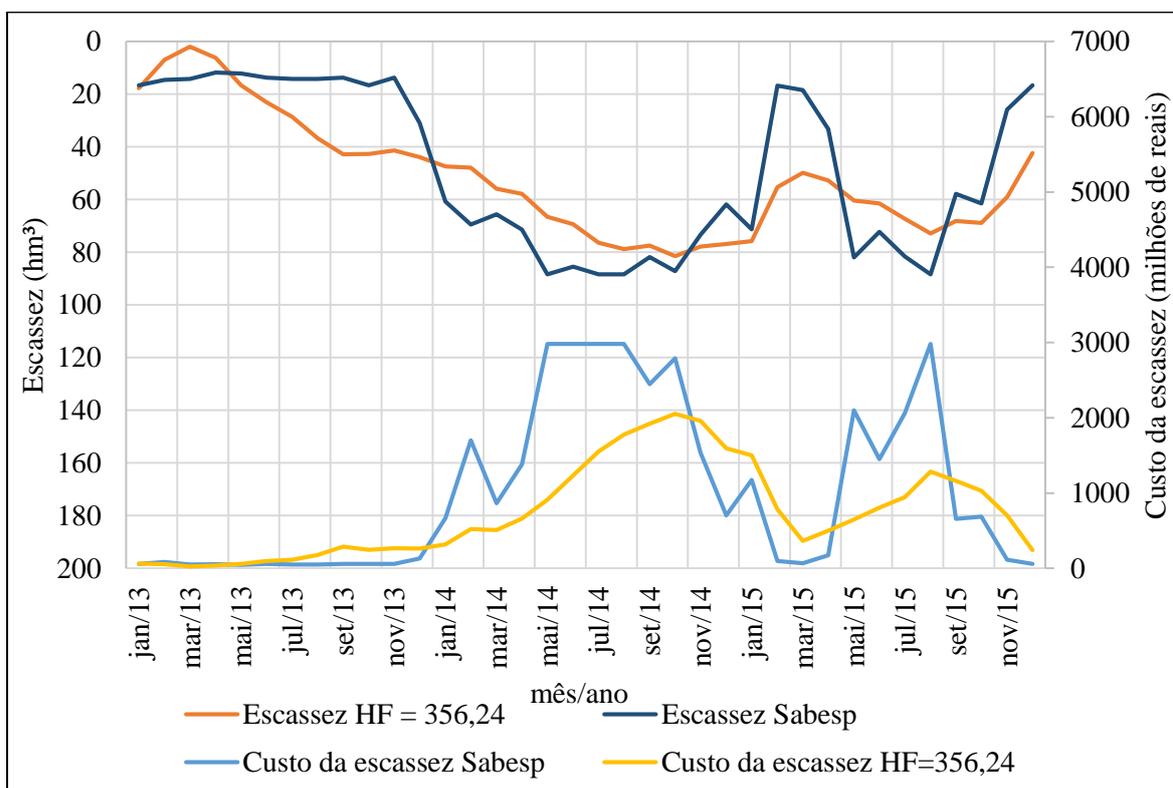
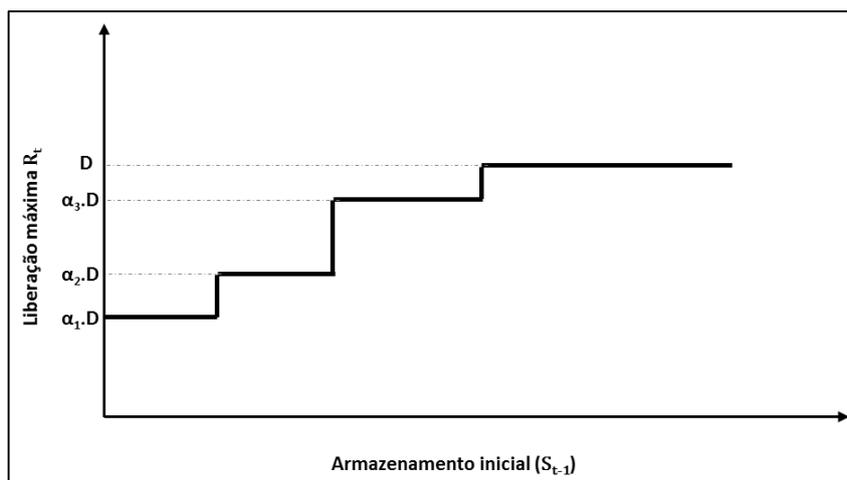


Figura 53. Política de *hedging* por zonas controlada pelo armazenamento inicial.



Fonte: adaptado de Neelakantan e Sasireka (2015).

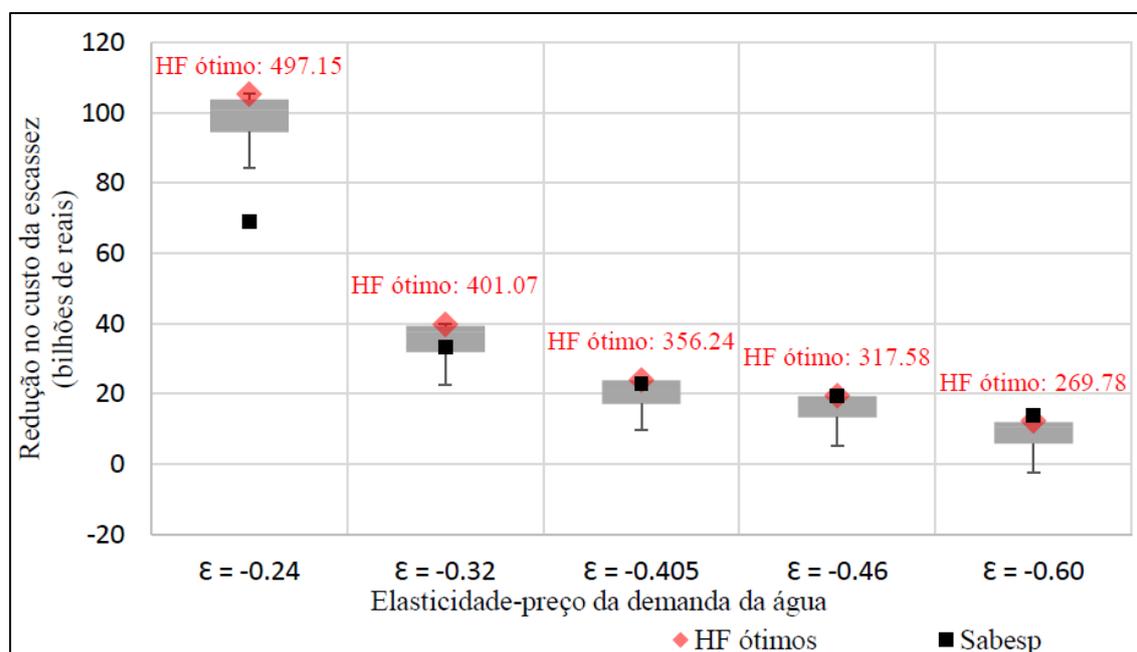
Entretanto, apesar de a soma dos quadrados dos déficits ter sido maior para a simulação da operação com *hedging*, quando confrontado o valor obtido para o custo da escassez das duas simulações, considerando o mesmo valor de elasticidade-preço da demanda por água ($\epsilon = -0,405$), a política de *hedging* ($HF = 356,24$) apresentou custo da escassez menor do que a regra de operação da Sabesp (a operação da Sabesp resultou em custo da escassez 1,43% maior do que aquela verificada para a operação com *hedging*). E em comparação com o custo da escassez obtido para a regra SOP, a operação da Sabesp e a operação com *hedging* apresentaram valores 21,95% e 23,07% menores, respectivamente.

A simulação realizada com o fator de *hedging* igual a 356,24 foi utilizada para fins de comparação com a operação da Sabesp, de modo a analisar ambas regras de operação considerando o valor de elasticidade-preço da demanda médio ($\epsilon = -0,405$). No entanto, para uma comparação mais completa entre a operação da Sabesp e a operação com *hedging* de um ponto, no que diz respeito às reduções obtidas no custo da escassez, foi preciso comparar os resultados para diversos fatores de *hedging*, contemplando os cinco valores de elasticidade e confrontar estes valores com aqueles obtidos com a operação da Sabesp.

Para realizar esta comparação, foram utilizadas as simulações realizadas para vários fatores de *hedging*, dentre eles, os fatores de *hedging* ótimos encontrados para cada uma das elasticidades e, somados a estes, fatores de *hedging* de 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, e 950 (sendo este último o fator de *hedging* que apresentou confiabilidade próxima àquela calculada para a operação da Sabesp).

A Figura 54 a seguir apresenta a análise estatística das reduções no custo da escassez obtidas com a aplicação das políticas de *hedging* de um ponto para as diferentes elasticidades-preço da demanda consideradas, e para fins de comparação de resultados no que concerne aos objetivos da política de operação analisada (minimizar o custo da escassez) foram plotados também as reduções no custo da escassez obtidas para a operação da Sabesp. Cabe ressaltar que os valores base para calcular as reduções alcançadas foram aqueles obtidos para a regra padrão de operação (SOP), para cada valor de elasticidade.

Figura 54. Análise estatística das reduções no custo da escassez obtidas com aplicação de políticas de *hedging* de um ponto para diferentes fatores de *hedging* (HF variando de 50 até 950).



Para gerar o gráfico *boxplot* da Figura 54 foi realizada uma análise estatística dos resultados de redução do custo da escassez obtidos para os diferentes fatores de *hedging* em comparação com a regra SOP. Para realizar esta análise estatística, primeiramente calculou-se o primeiro e o terceiro quartil da amostra. O primeiro quartil (Q_1) é o valor para o qual 25% dos valores da amostra se encontram abaixo, e o terceiro quartil (Q_3) é o valor para o qual 25% da amostra encontram-se acima. Ou seja, 50% dos valores da amostra se encontram entre Q_1 e Q_3 .

Na Figura 54 as caixas cinzas representam o intervalo no qual se encontram 50% dos valores da amostra. E as hastes superior e inferior representam, respectivamente, os valores máximos e mínimos encontrados, excluindo-se os *outliers*. Para definir os limites para detecção de *outliers* utiliza-se as Equações 26 e 27, onde a Equação 26 é utilizada para o cálculo do limite inferior e a Equação 27 do limite superior.

$$Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1) \quad \text{Equação 26}$$

$$Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_1) \quad \text{Equação 27}$$

Tabela 19. Análise estatística dos resultados obtidos para redução do custo da escassez para a política de *hedging* de um ponto.

	$\epsilon = -0,24$	$\epsilon = -0,32$	$\epsilon = -0,405$	$\epsilon = -0,46$	$\epsilon = -0,60$
Máximo	105,38	39,89	24,05	19,57	12,44
3º quartil (Q ₃)	103,76	39,44	23,84	19,38	12,02
Média	95,40	34,82	19,95	15,68	8,41
Mediana	100,82	37,64	22,37	17,75	10,69
1º quartil (Q ₁)	94,56	31,95	17,20	13,39	5,99
Mínimo	37,52	16,05	7,11	2,98	-4,79
Limite superior para definição dos <i>outliers</i>	117,56	50,67	33,81	28,37	21,07
Limite inferior para definição dos <i>outliers</i>	80,76	20,71	7,23	4,41	-3,06
Máximo N.O.	105,38	39,89	24,05	19,57	12,44
Mínimo N.O.	84,31	22,58	9,75	5,48	-2,39

Valores em bilhões de reais, referentes à série temporal de 86 anos, com 1032 períodos de um mês. N.O.: não *outlier*.

Para a elasticidade-preço da demanda igual a -0,24, a redução máxima no custo da escassez da água alcançada com a política de *hedging* de um ponto é de 105,38 bilhões de reais quando comparado com a regra SOP, enquanto para a regra de operação da Sabesp essa redução é de 69,09 bilhões de reais (34,44% menor que para o fator de *hedging* ótimo HF = 497,15). A redução mínima alcançada com a política de *hedging* é de 37,52 bilhões de reais; e desconsiderando os *outliers*, este valor chega a 84,31 bilhões de reais.

Em relação à elasticidade-preço da demanda igual a -0,32, a redução máxima no custo da escassez da água alcançada com a política de *hedging* de um ponto é de 39,89 bilhões de reais quando cotejado com a regra SOP. Para a regra de operação da Sabesp essa redução é de 33,43 bilhões de reais (16,18% menor que para o fator de *hedging* ótimo HF =

401,07). A redução mínima alcançada com a política de *hedging* é de 16,05 bilhões de reais; e desconsiderando os *outliers*, este valor chega a 22,58 bilhões de reais.

No que diz respeito à elasticidade-preço da demanda igual a -0,405, a redução máxima no custo da escassez da água alcançada com a política de *hedging* de um ponto é de 24,05 bilhões de reais em comparação com a regra SOP, enquanto para a regra de operação da Sabesp essa redução é de 22,88 bilhões de reais (4,84% menor que para o fator de *hedging* ótimo HF = 356,24). A redução mínima alcançada com a política de *hedging* é de 7,11 bilhões de reais; e desconsiderando os *outliers*, este valor chega a 9,75 bilhões de reais.

No que concerne à elasticidade-preço da demanda igual a -0,46, a redução máxima no custo da escassez da água alcançada com a política de *hedging* de um ponto é de 19,57 bilhões de reais quando confrontado com a regra SOP. Para a regra de operação da Sabesp essa redução é de 19,55 bilhões de reais (0,08% maior que para o fator de *hedging* ótimo HF = 317,58). A redução mínima alcançada com a política de *hedging* é de 2,98 bilhões de reais; e desconsiderando os *outliers*, este valor chega a 5,48 bilhões de reais.

No que se refere à elasticidade-preço da demanda igual a -0,60, a redução máxima no custo da escassez da água alcançada com a política de *hedging* de um ponto é de 12,44 bilhões de reais quando cotejado com a regra padrão de operação, enquanto para a regra de operação da Sabesp essa redução é de 14,11 bilhões de reais (13,43% maior que para o fator de *hedging* ótimo HF = 269,78). Para este valor de elasticidade, houveram fatores de *hedging* que apresentaram custo da escassez maior do que aquele resultante da política de operação padrão (16,50 bilhões de reais superior e, considerando os *outliers*, este valor chega a 18,90 bilhões de reais).

Conforme aumenta o valor da elasticidade, em termos absolutos, diminui a variabilidade dos valores interquartis (entre Q_1 e Q_3), representados no gráfico *boxplot* da Figura 54 pelas caixas cinzas, que, conforme pode ser observado, vão diminuindo ao longo do eixo das abscissas. De modo que o valor de elasticidade-preço da demanda igual à -0,60 apresenta a menor amplitude interquartil, ou seja, menor dispersão dos valores situados na faixa onde se concentram 50% dos valores da amostra.

Desta forma, haja vista as variações e incertezas decorrentes da estimação do valor da elasticidade seria necessário realizar um estudo mais aprofundado com o objetivo de definir o valor da elasticidade-preço da demanda para o abastecimento urbano na área de abrangência do Sistema Cantareira para que assim fosse possível definir um único fator de

hedging ótimo para uma política de *hedging* de um ponto e, então, seria possível realizar a comparação com outras regras de operação.

À medida que a elasticidade aumenta, em termos absolutos, ela se aproxima da região onde o módulo da elasticidade é unitário, situação na qual uma redução no volume de água liberado provoca um acréscimo proporcional no preço. Quanto mais o valor da elasticidade se afasta da unidade, em direção à valores menores, em módulo, maior é o acréscimo no preço para o mesmo corte na liberação da água. Ou seja, para valores menores de elasticidade-preço da demanda, os preços variam mais do que proporcionalmente com as alterações nas liberações de água para atendimento das demandas (conforme ilustrado na Figura 14, página 45).

Quanto mais proporcionais forem as relações redução nas liberações (m^3) *versus* preço (R\$/ m^3), menos vantajosas as políticas de *hedging* serão, haja vista que a proporcionalidade entre as liberações e o preço aproximam a curva de benefício marginal do comportamento linear. Conforme descrito por Hashimoto et al. (1982), quando as perdas (como função da vazão liberada) forem lineares, a política padrão de operação é a melhor opção, haja vista que, deve-se priorizar as liberações para benefício imediato, retardando os déficits o máximo possível, uma vez que as perdas econômicas associadas à uma falha de grande magnitude ou a várias falhas menores será a mesma, e que, em retardando a falha no abastecimento, devido às incertezas associadas com as precipitações pode ser que ocorra uma recuperação no nível dos reservatórios, de forma que a demanda possa ser atendida em sua totalidade e a falha não venha a ocorrer.

À medida em que o valor da elasticidade aumenta, em termos absolutos, a dispersão dos valores de redução no custo da escassez diminui (Figura 55). Isso significa que as diversas estratégias de *hedging* produzem resultados um pouco mais parecidos de redução no custo da escassez. Tal comportamento pode ser explicado por conta do comportamento das curvas de custo da escassez em função dos fatores de *hedging*, conforme ilustrado na Figura 55. Nesta figura pode-se se observar que para valores de elasticidade maiores em módulo a curvatura é menor e, portanto, apresenta menor variação nos valores de custo da escassez com o aumento do fator de *hedging*.

Este comportamento se deve ao fato de que a equação que descreve o custo da escassez é obtida por meio da integração da curva de benefício marginal, ou seja, é a área sob esta curva. E, conforme aumenta o fator de *hedging*, diminui a quantidade de água

liberada quando a disponibilidade hídrica é menor do que a demanda alvo mais o fator de *hedging* (gatilho do *hedging*), uma vez que o fator de *hedging* representa o grau de racionamento, e assim, o fator de redução da disponibilidade hídrica para atendimento das demandas, de forma que aumenta o valor marginal, e conseqüentemente, o custo da escassez (Figura 56).

Figura 55. Curva de custo da escassez para cada valor de elasticidade-preço da demanda considerado em função do fator de *hedging* aplicado.

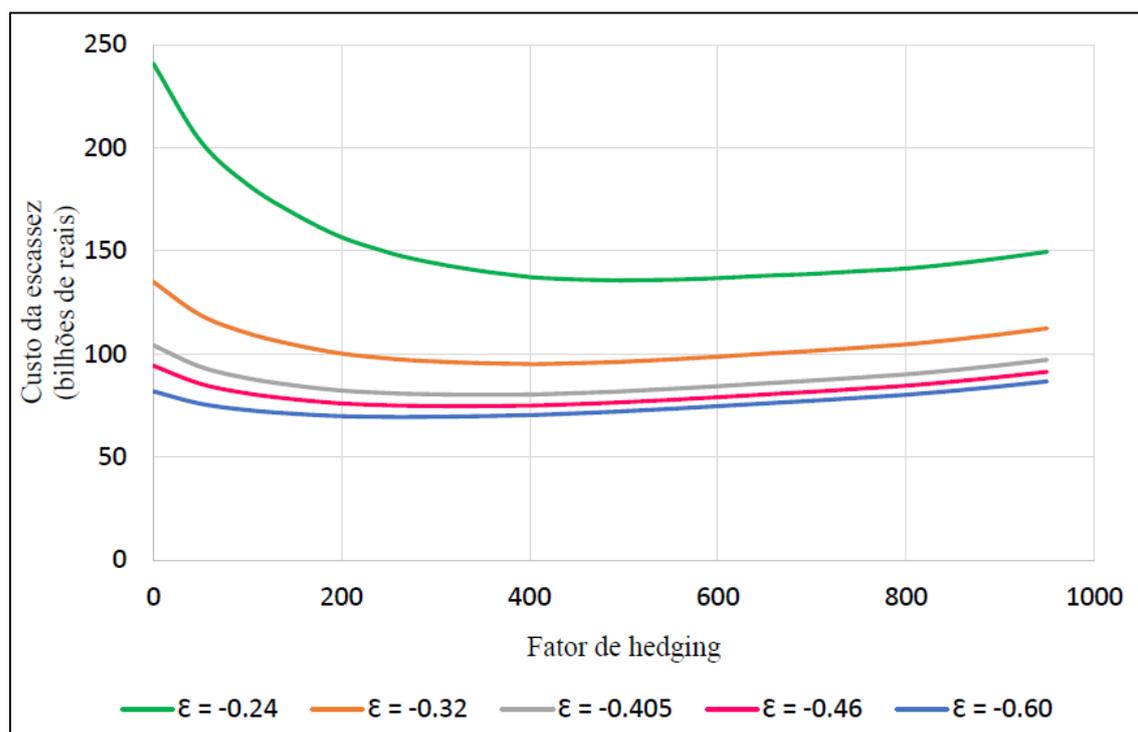
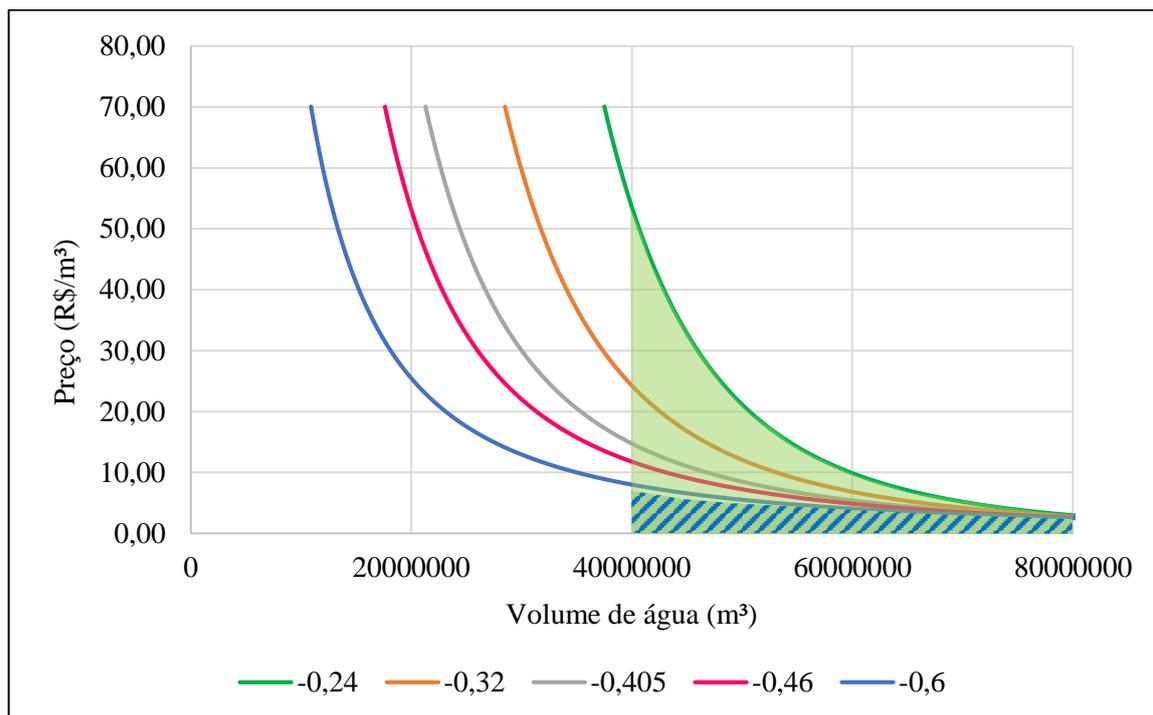


Figura 56. Integração da curva de benefício marginal para cálculo do custo da escassez.



Conforme o valor da elasticidade aumenta, em termos absolutos, a redução obtida com a operação da Sabesp se torna melhor que aquela obtida com a política de *hedging* de um ponto, isso acontece por conta de que a política de *hedging* reduz sua eficiência conforme se tornam mais proporcionais as relações redução nas liberações de água *versus* custo da escassez, que é o que acontece quando o valor da elasticidade se aproxima do valor da unidade ($\epsilon = -1$). Já a regra de operação da Sabesp apresenta resultados melhores nestas condições e desempenho pior quando as funções de perda têm curvatura acentuada.

A Tabela 20 apresenta a síntese dos resultados obtidos com as diferentes regras de operação analisadas (política padrão de operação, política de *hedging* de um ponto e regra de operação da Sabesp) no que diz respeito à escassez e seu respectivo custo e à confiabilidade do sistema.

Tabela 20. Síntese dos resultados obtidos com as diferentes regras de operação.

	SOP	Fator de <i>hedging</i> ótimo					Sabesp	
		269,78	317,58	356,24	401,07	497,15		
ε = -0,24	241,01	-	-	-	-	135,63	171,92	
Custo da escassez (bilhões de reais)	ε = -0,32	135,07	-	-	-	95,18	-	101,63
	ε = -0,405	104,25	-	-	80,20	-	-	81,36
	ε = -0,46	94,30	-	74,74	-	-	-	74,75
	ε = -0,60	81,94	69,50	-	-	-	-	67,83
Escassez (hm ³)	5425,6	7509,9	7979,2	8382,1	8838,6	9923,9	6849,0	
Confiabilidade	0,88	0,75	0,71	0,69	0,67	0,60	0,24	

Como pode ser observado na Tabela 20, a regra de operação da Sabesp apresenta confiabilidade menor que aquelas obtidas com a aplicação da política de *hedging* de um ponto com os fatores de *hedging* ótimos, no entanto, a sua vulnerabilidade não é reduzida na mesma proporção, haja vista que a política de *hedging* de um ponto apresenta reduções similares ou até mesmo maiores do custo da escassez sem reduzir tanto a confiabilidade do sistema.

Os resultados obtidos para a redução no custo da escassez para a política de *hedging* de um ponto, considerando os fatores de *hedging* ótimos, foram bem parecidos com àqueles encontrados para a regra de operação da Sabesp, para os valores de elasticidade-preço da demanda igual a -0,60, -0,46 e -0,405, sendo esta redução ligeiramente maior para a regra da Sabesp no primeiro caso, enquanto nos dois últimos as reduções foram maiores para a política de operação de *hedging* de um ponto. De forma que, em comparação com o custo da escassez da política padrão de operação, a regra as Sabesp e a regra com *hedging* apresentaram diferenças de 2,0% para a elasticidade igual a -0,60, nula (0,0%) para a elasticidade igual a -0,46, e de 1,1% para a elasticidade igual a -0,405.

As diferenças mais significativas entre os resultados de redução no custo da escassez para a regra de operação da Sabesp e a regra com *hedging* se deram para os valores de elasticidade igual a -0,32 e, principalmente, para -0,24. Para a elasticidade igual a -0,32 a diferença foi de 4,8% e para a elasticidade igual a -0,24 foi de 15,1%, ressaltando-se que em ambos os casos a redução foi maior para a operação com *hedging*.

Destaca-se que, em decorrência da premissa adotada de que a demanda de 33 m³/s não representa a demanda máxima a ser atendida, mesmo que houvesse a liberação dos

33 m³/s em todos os períodos, ainda haveria um custo da escassez, por ter se considerado que há uma demanda reprimida. Caso a demanda de 33 m³/s fosse atendida plenamente em 100% dos períodos analisados, o custo da escassez resultante seria de R\$24,11 bilhões para a elasticidade igual a -0,24; R\$27,09 bilhões para elasticidade igual a -0,32; R\$27,50 bilhões para a elasticidade igual a -0,405; R\$27,41 bilhões para a elasticidade igual a -0,46; e R\$30,20 bilhões para a elasticidade igual a -0,60.

Desta forma, dentre os valores de custo da escassez calculados para as diferentes regras de operação, uma parte destes valores é referente ao custo mínimo da escassez, o qual não poderia ser anulado nem mesmo para uma situação em que a demanda de 33 m³/s fosse atendida em sua totalidade em 100% do tempo. A participação do custo da escassez mínimo sobre o custo da escassez total variou para a elasticidade igual a -0,24 de 10,0 a 17,8%, para elasticidade igual a -0,32 de 20,1 a 28,5%; para elasticidade igual a -0,405, de 26,4 a 34,3%; para elasticidade igual a -0,46, de 29,1 a 36,7%; e para elasticidade igual a -0,60, de 36,9 a 44,5%. Sendo a menor participação para a regra padrão de operação e a maior para a regra de operação analisada que apresentou maior redução no custo da escassez para cada valor de elasticidade.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo verificar se existe uma estratégia de *hedging* capaz de minimizar o custo da escassez da água para o Sistema Cantareira em comparação com outras estratégias e também com a atual regra utilizada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) para operar o Sistema Cantareira, o qual consiste em um complexo conjunto de reservatórios para abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo.

Os resultados permitem concluir que nem sempre a regra de *hedging* de um ponto é a melhor opção, pois dependendo do objetivo – que no estudo em questão é a minimização do custo da escassez da água – e dos parâmetros utilizados para calcular a função objetivo, como é o caso da elasticidade-preço da demanda, os resultados podem variar, de modo a tornar esta política de operação menos vantajosa. Como foi possível constatar, elasticidades-preço se aproximando da unidade são indicativos de sistemas onde a relação custo-quantidade é mais próxima da linear, condição na qual o *hedging* deixa de ser vantajoso.

Verificou-se que para reduzir a susceptibilidade do sistema a déficits de grandes magnitudes, a operação da Sabesp para o Sistema Cantareira, resulta em falhas menores e mais frequentes, reduzindo a confiabilidade do sistema, comportamento que é compatível com os preceitos das políticas de *hedging*.

A partir da realização do presente trabalho foi possível observar que a regra de operação utilizada pela Sabesp para o Sistema Cantareira se aproxima de uma política de *hedging* por zonas controlada pelo armazenamento inicial, de modo que promove uma salvaguarda, reduzindo a liberação de água para atendimento das demandas para benefício imediato para atender a possíveis demandas futuras. Entretanto, os resultados indicam que a política de operação da Sabesp produziu menores salvaguardas contra possíveis déficits futuros do que a estratégia de *hedging* de um ponto aqui analisada, resultando em menor redução nos custos da escassez para a todos os valores de elasticidade-preço, excetuando-se o valor de elasticidade igual a -0,6.

Os métodos utilizados para realizar as simulações funcionaram conforme o esperado, dado que os gráficos gerados para disponibilidade hídrica *versus* liberação se comportaram exatamente como disposto na literatura.

No presente trabalho foi possível confirmar que conforme aumenta a confiabilidade do sistema, aumenta também a sua vulnerabilidade, conforme explicitado por Hashimoto et al. (1982) e Moy et al. (1986).

Sugere-se para trabalhos futuros que seja realizada uma estimação para o valor da elasticidade-preço da demanda para o abastecimento urbano na área de abrangência do Sistema Cantareira para que seja possível definir um único fator de *hedging* ótimo para uma política de *hedging* de um ponto e, então, cotejar as reduções no custo da escassez alcançadas com esta política de operação com outras regras de operação de reservatórios.

Além disso, trabalhos futuros podem verificar a aplicabilidade de outras formas de políticas de salvaguarda para a operação do Sistema Cantareira, com vistas à redução da magnitude dos déficits no atendimento da demanda e, conseqüentemente, à redução da vulnerabilidade do sistema.

Sugere-se ainda para futuros trabalhos que sejam realizadas simulações da política de operação da Sabesp aumentando as restrições das vazões de retirada dependendo da quantidade de água armazenada no sistema em relação ao volume útil total, isto é, reduzir a quantidade máxima que pode ser liberada para situações em que o volume se encontra abaixo de uma determinada condição de armazenamento. Desta forma, será possível aumentar o volume de água reservado para usos futuros, aumentando a salvaguarda, e verificar a redução no custo da escassez, e também outros critérios, para analisar o desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional**. Engecorps/Cobrape – Brasília, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Encarte Especial sobre a Crise Hídrica: Informe 2014**. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR, Brasília – DF, 2015.

AGTHE, D. E.; BILLINGS, R. B. Dynamic models of residential water demands. **Water Resources Research**, vol. 16, n. 3, p. 476-480, 1980.

ALVIM, Augusto Mussi. **A Disposição a Pagar pelo Uso da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo**. Estudos do CEPE, Santa Cruz do Sul, n. 21, p. 31-50, 2005.

ANDRADE, T. A., BRANDÃO, A. S. P., LOBÃO, W. J. A. e SILVA, S. L. Q. Saneamento urbano: a demanda residencial por água. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, vol.25, n.3, p.427-448, 1995.

ARAÚJO, J.; PAGANINE, H.; BORTONI, L.; GUEDES, S. Escassez de água: cada gota é preciosa. **Em Discussão!: os principais debates do Senado Federal**, v. 5, n. 23, dez. 2014.

BANCO DO NORDESTE DO BRASIL – BNB. Estudo de demanda de água do Nordeste e atualização dos índices de custo-eficiência de projetos de esgotamento sanitário da região Nordeste do Brasil. Executado pela Empresa PBLM Consultoria Ltda. Fortaleza, 1997.

BAYAZIT, M.; ÜNAL, N. E. Effects of *hedging* on reservoir performance. **Water resources research**, v. 26, n. 4, p. 713-719, 1990.

BHATIA, R., CESTTI, R. e WINPENNY, J. Water conservation and reallocation: best practice cases in improving economic efficiency and environmental quality. World Bank – ODI Joint Study, 1995.

BILLINGS, R. B. Demand-based benefit-cost model of participation in water project. **Journal of Water Resources Planning and Management**, vol. 116, n. 5, p. 593-609, 1990.

BOWER, Blair T.; HUFSCHMIDT, Maynard M.; REEDY, William W. Operating procedures: their role in the design of water-resource systems by simulation analyses. **Design of Water Resource Systems**, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, p. 443-458, 1962.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União** de 09 de janeiro de 1997, Seção 1, p. 470, 1997.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2016.

CANCELLIERE, Antonino; ANCARANI, Alessandro; ROSSI, Giuseppe. Susceptibility of water supply reservoirs to drought conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 3, n. 2, p. 140-148, 1998.

CAPOBIANCO, J. P.; JACOBI, P. R. O dia em que faltou água na torneira. **Folha de São Paulo**, 28 nov. 2014. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/opiniaio/2014/11/1554281-joao-paulo-capobianco-e-pedro-roberto-jacobi-o-dia-em-que-faltou-agua-na-torneira.shtml>>. Acesso em: 01/05/2016.

CÔRTEZ, Pedro Luiz et al. Crise de abastecimento de água em São Paulo e falta de planejamento estratégico. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 7-26, 2015.

DALHUISEN, Jasper M. et al. Price and income elasticities of residential water demand: a meta-analysis. **Land economics**, v. 79, n. 2, p. 292-308, 2003.

DANIELSON, L. E. An analysis of residential demand for water using micro time-series. **Water Resources Research**, vol. 15, n. 4, p. 763-767, 1978.

DANTAS, Tiago. Desabastecimento faz preço de caminhão-pipa dobrar em SP. **Jornal O Globo**, 17 out. 2014. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/brasil/desabastecimento-faz-preco-de-caminhao-pipa-dobrar-em-sp-14271656>>. Acesso em: 17/05/2016.

DARIANE, Alireza B; KARAMI, Farzane. Comparison of *Hedging* Policies in Reservoir Management under Drought Condition. **10th International Congress on Advances in Civil Engineering**, Ankara, Turkey, 2012.

DESIDÉRIO, Mariana. O que vai acontecer se São Paulo ficar realmente sem água? **Revista Exame**, 28 jan. 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/brasil/zoom/o-que-voce-precisa-saber-sobre-a-crise-da-agua/>>. Acesso em: 15/05/2016.

DRAPER, Andrew J.; LUND, Jay R. Optimal *hedging* and carryover storage value, **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 1, p. 83-87, 2004.

DUPUIT, Jules. On the measurement of the utility of public works. **International Economic Papers**, v. 2, n. 1952, p. 83-110, 1844.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO – EMPLASA. **Indicadores da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Emplasa, 2016. Disponível em: <<http://www.emplasa.sp.gov.br/home/artigo/?UserKey=regiao-metropolitana-de-sao-paulo&Type=Indicador>> Acesso em 20/05/2016.

ESPEY, M.; ESPEY, J.; SHAW, W. D. Price Elasticity of Residential Demand for Water: A Meta-analysis. **Water Resources Research** 33 (6): 1369–1374, 1997.

EUM, Hyung-Il; KIM, Young-Oh; PALMER, Richard N. Optimal drought management using sampling stochastic dynamic programming with a *hedging* rule. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 137, n. 1, p. 113-122, 2011.

FERNANDES, Sarah. Dengue: um terço dos focos está em recipientes para armazenar água em SP. **Rede Brasil Atual**, 14 mar. 2016. Disponível em: <<http://www.redebrasilatual.com.br/saude/2016/03/um-terco-dos-focos-de-dengue-em-sp-sao-recipientes-para-armazenar-agua-na-crise-hidrica-4805.html>>. Acesso em: 20/05/2016.

FOSTER, H. S. e BEATTIE, B. R. Urban residential demand for water in the United States. **Land Economics**, vol. 55, n. 1, p. 43-58, 1979.

FRACALANZA, A. P.; FREIRE, T. M. Crise da água na Região Metropolitana de São Paulo: injustiça ambiental, privatização e mercantilização de um bem comum. **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 19, n. 3, p. 464-478, set./dez. 2015.

GIBBS, K. C. Price variable in residential water demand models. **Water Resources Research**, vol. 14, n. 1, p. 15-18, 1978.

GOTTLIEB, M. Urban domestic demand for water: a Kansas study. **Land Economics**, vol. 39, p. 204-210, 1963.

GRIFFIN, Ronald C. **Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects**. MIT Press Books, v. 1, 2006.

HANEMANN, W. Michael. The economic conception of water. Em: **Water crisis: myth or reality**, p. 61-91, 2006.

HASHIMOTO, Tsuyoshi; STEDINGER, Jery R.; LOUCKS, Daniel P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water resources research**, v. 18, n. 1, p. 14-20, 1982.

HELLER, Léo; DE PÁDUA, Valter Lúcio. **Abastecimento de água para consumo humano**. Editora UFMG, Vol.1, 2ª edição revista e atualizada, 2010.

HEWITT, Julie A.; HANEMANN, W. Michael. A discrete/continuous choice approach to residential water demand under block rate pricing. **Land Economics**, p. 173-192, 1995.

HOWE, C. W. e LINAWEAVER, F. P. The impact of price on residential water demand and its relation to system design and price structure. **Water Resources Research**, vol. 3, n. 1, p. 13-32, 1967.

HOWE, C. W. The impact of price on residential water demand: some new insights. **Water Resources Research**, vol. 18, n. 4, p. 713-716, 1982.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER AND THE ENVIRONMENT (ICWE). **The Dublin Statement on Water and Sustainable Development**. Dublin, Ireland, on January 26-31, 1992.

JACOBI, P. R.; CIBIM, J. C.; SOUZA, A. N. Crise da água na Região Metropolitana de São Paulo – 2013-2015. **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 19, n. 3, p. 422-444, set./dez. 2015.

JONES, C. V. e MORRIS, J. R. Instrumental price estimates and residential water demands. **Water Resources Research**, vol. 20, n. 2, p. 197-202, 1984.

LOBEL, F.; SPUZA, F.; IORY, N. Racionamento em São Paulo completa um ano e amplia transtornos. **Jornal Folha de São Paulo**, 28 fev. 2015. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2015/02/1596237-acionamento-em-sao-paulo-completa-um-ano-e-amplia-transtornos.shtml>>. Acesso em: 15/05/2016.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models, and applications**, Studies and Reports in Hydrology, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2005.

LUND, J. R.; GUZMAN, J. **Developing seasonal and long-term reservoir system operation plans using HEC-PRM**. Technical Report RD-40, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, 1996.

MARQUES, Guilherme F. et al. Economically driven simulation of regional water systems: Friant-Kern, California. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 132, n. 6, p. 468-479, 2006.

MARSHALL, Alfred et al. The pure theory of (domestic) values. **History of Economic Thought Books**, 1879.

MARTINS, E.S.; BRAGA, C.F.C.; SOUZA FILHO, F.A.; MORAES, M.A.; MARQUES, G.F.; MEDIONDO, E.M.; FREITAS, M.A.; VAZQUEZ, V.; ENGLE, N.; DE NYS, E. Climate Change Impacts on Water Resources Management: Adaptation Challenges and Opportunities in Northeast Brazil. Latin America and Caribbean Region – **Environment and Water Resources Occasional Paper Series**. The World Bank. 2013.

MEDEIROS FILHO, Carlos Fernandes. **Abastecimento de Água**. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, Paraíba, 2009.

MEDEIROS, Paulo da Costa; RIBEIRO, Márcia Maria Rios. Elasticidade-preço da demanda por água na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Gravatá, PE, 2006.

MONCUR, J. E. T. Urban water pricing and drought management. **Water Resources Research**, vol. 23, n.3, p.393-398, 1987.

MOY, Wai-See; COHON, Jared L.; REVELLE, Charles S. A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. **Water Resources Research**, v. 22, n. 4, p. 489-498, 1986.

NEELAKANTAN, T. R.; SASIREKA, K. Hydropower Reservoir Operation using Standard Operating and Standard *Hedging* Policies. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 2, p. 1191-1196, 2013.

NEELAKANTAN, T. R.; SASIREKA, K. Review of Hedging Rules Applied to Reservoir Operation. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 7, n. 5, p. 1571-1580, 2015.

NEELAKANTAN, T. R.; PUNDARIKANTHAN, N. V. *Hedging* rule optimisation for water supply reservoirs system. **Water resources management**, v. 13, n. 6, p. 409-426, 1999.

NIESWIADOMY, M. L. Estimating urban residential water demand: effects of price structure, conservation, and education. **Water Resources Research**, vol. 28, n. 3, p. 609-615, 1992.

Nota Técnica Conjunta ANA-DAEE. Subsídios para a análise do pedido de outorga do Sistema Cantareira e para a definição das condições de operação dos seus reservatórios. Relatório Final. Julho de 2004.

PEIXOTO, L. S. Derivação de regras operacionais de proteção contra déficits de suprimento de sistemas de reservatórios via algoritmos genéticos. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil, 2006.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Microeconomia**. São Paulo. Makron Books, 1999.

PINT, Ellen M. Household responses to increased water rates during the California drought. **Land economics**, p. 246-266, 1999.

PORTARIA DAEE Nº 1213, DE 06 DE AGOSTO DE 2004. Secretaria de Estado de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento - Departamento de Águas e Energia Elétrica. São Paulo, 2004.

RESK, Felipe. Falta de água em SP faz caminhão-pipa ficar até 275% mais caro. **Jornal Estado de São Paulo**, 16 out. 2014. Disponível em: <<http://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral,falta-de-agua-em-sp-faz-caminhao-pipa-ficar-ate-275-mais-carro,1577463>>. Acesso em: 17/05/2016.

Resolução Conjunta ANA-DAEE. Dados de Referência Acerca da Outorga do Sistema Cantareira. 30 de abr. de 2016.

Resolução Conjunta ANA-DAEE Nº 1.200 de 22 de outubro de 2015.

Resolução Conjunta ANA-DAEE Nº 428 de 4 de agosto de 2004.

REVELLE, Charles; JOERES, Erhard; KIRBY, William. The linear decision rule in reservoir management and design: 1. Development of the stochastic model. **Water Resources Research**, v. 5, n. 4, p. 767-777, 1969.

RIBEIRO, Márcia Maria Rios; LANNA, Antonio Eduardo; PEREIRA, Jaildo Santos. Elasticidade-preço da demanda e a cobrança pelo uso da água. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 1999.

RODRIGUES, C.; VILLELA, F. N. J. Disponibilidade e escassez de água na Grande São Paulo: elementos-chave para compreender a origem da atual crise de abastecimento. **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 19, n. 3, p. 399-421, set./dez. 2015.

ROGERS, Peter; DE SILVA, Radhika; BHATIA, Ramesh. Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. **Water policy**, v. 4, n. 1, p. 1-17, 2002.

SALES, Robson. Fatia de São Paulo no PIB brasileiro cai para 32,1% em 2013. **Revista Valor Econômico**, 19 nov. 2015. Disponível em:< <http://www.valor.com.br/brasil/4322336/fatia-de-sao-paulo-no-pib-brasileiro-cai-para-321-em-2013>>. Acesso em: 20/05/2016.

SCHNEIDER, M. L. e WHITLACH, E. E. User-specific water demand elasticities. **Journal of Water Resources Planning and Management**, vol. 117, n. 1, p. 52-73, 1991.

SHIAU, J. T. Water release policy effects on the shortage characteristics for the Shihmen reservoir system during droughts. **Water resources management**, v. 17, n. 6, p. 463-480, 2003.

SHIAU, J. T.; LEE, H. C. Derivation of Optimal *Hedging* Rules for a Water-supply Reservoir through Compromise Programming, **Water Resour Management**, v. 19, n. 2, p. 111-132, 2005.

SHIAU, Jenq-tzong. Analytical optimal *hedging* with explicit incorporation of reservoir release and carryover storage targets. **Water Resources Research**, v. 47, n. 1, p.1-17, 2011.

SHIAU, Jenq-Tzong. Optimization of reservoir *hedging* rules using multiobjective genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 135, n. 5, p. 355-363, 2009.

SHIH, Jihh-Shyang; REVELLE, Charles. Water supply operations during drought: A discrete *hedging* rule. **European Journal of Operational Research**, v. 82, n. 1, p. 163-175, 1995.

SHIH, Jihh-Shyang; REVELLE, Charles. Water-supply operations during drought: Continuous *hedging* rule. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 120, n. 5, p. 613-629, 1994.

SOUZA, J. A. **Simulação da cobrança de água subterrânea na bacia do rio Paraíba**. 2010. Dissertação de mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande–UFCG. Campina Grande-PB.

SRINIVASAN, K.; PHILIPOSE, M. C. Effect of *hedging* on over-year reservoir performance. **Water Resources Management**, v. 12, n. 2, p. 95-120, 1998.

SRINIVASAN, K.; PHILIPOSE, M. C. Evaluation and selection of *hedging* policies using stochastic reservoir simulation. **Water resources management**, v. 10, n. 3, p. 163-188, 1996.

STEDINGER, J. R. The performance of LDR models for preliminary design and reservoir operation. **Water Resources Research**, 20(2), 215-224, 1984.

STEINSCHNEIDER, Scott; BROWN, Casey. Dynamic reservoir management with real-option risk *hedging* as a robust adaptation to nonstationary climate. **Water Resources Research**, v. 48, n. 5, p. 1-16, 2012.

TILMANT, Amaury; PINTE, D.; GOOR, Quentin. Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. **Water Resources Research**, v. 44, n. 12, 2008.

TU, Ming-yen et al. Optimization of *Hedging* Rules for Reservoir Operations. **Journal Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 1, p. 3-13, 2008.

TU, Ming-Yen; HSU, Nien-Sheng; YEH, William W.-G. Optimization of reservoir management and operation with *hedging* rules. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2003.

TURNOVSKY, S. The demand for water: some empirical evidence on consumers' response to a commodity uncertain in supply. **Water Resources Research**, vol. 5, n. 2, p. 350-361, 1969.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION – UNESCO. **Water for a Sustainable World**. Paris, 2015.

VICECONTI, Paulo Eduardo Vilchez; DAS NEVES, Silvério. **Introdução à economia**. Frase Editora, 2003.

VOITCH, Talita Barros. Crise hídrica eleva risco de recessão. **Jornal Gazeta do Povo**, 24 jan. 2015. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/crise-hidrica-eleva-risco-de-recessao-ej6qhr7l4w54tpjr0651pam>>. Acesso em: 20/05/2016.

WONG, S. T. A model on municipal water demand: a case study of Northeastern Illinois. **Land Economics**, vol. 48, n. 1, p. 34-44, 1972.

WURBS, Ralph Allen. **Modeling and analysis of reservoir system operations**. Prentice Hall, 1996.

YOO, James et al. Estimating the price elasticity of residential water demand: the case of Phoenix, Arizona. **Applied Economic Perspectives and Policy**, 2014.

YOU, Jiing-Yun; CAI, Ximing. Determining forecast and decision horizons for reservoir operations under *hedging* policies. **Water resources research**, v. 44, n. 11, 2008c.

YOU, Jiing-Yun; CAI, Ximing. *Hedging* rule for reservoir operations: 1. A theoretical analysis. **Water resources research**, v. 44, n. 1, 2008a.

YOU, Jiing-Yun; CAI, Ximing. *Hedging* rule for reservoir operations: 2. A numerical model. **Water resources research**, v. 44, n. 1, 2008b.

YOUNG, R. A. Price elasticity of demand for municipal water: a case study of Tucson, Arizona. **Water Resources Research**, vol. 9, n. 4, p.1068-1072, 1973.

ZHAO, Jianshi; CAI, Ximing; WANG, Zhongjing. Optimality conditions for a two-stage reservoir operation problem. **Water Resources Research**, v. 47, n. 8, 2011.