

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

PEDRO HENRIQUE BOF

UMA PROPOSTA DE INSTRUMENTO DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA NA BACIA DO RIO
SÃO MARCOS BASEADA NO VALOR ECONÔMICO DA ÁGUA

PORTO ALEGRE

2018

PEDRO HENRIQUE BOF

UMA PROPOSTA DE INSTRUMENTO DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA NA BACIA DO RIO
SÃO MARCOS BASEADA NO VALOR ECONÔMICO DA ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques

PORTO ALEGRE

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Bof, Pedro Henrique
UMA PROPOSTA DE INSTRUMENTO DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA
NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS BASEADA NO VALOR ECONÔMICO
DA ÁGUA / Pedro Henrique Bof. -- 2018.
110 f.
Orientador: Guilherme Fernandes Marques.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas
Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos
Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS,
2018.

1. Economia de Recursos Hídricos. 2. Valor
Econômico da Água. 3. Alocação Negociada. 4. Gestão de
Recursos Hídricos. 5. Instrumentos Econômicos. I.
Fernandes Marques, Guilherme, orient. II. Título.

PEDRO HENRIQUE BOF

UMA PROPOSTA DE INSTRUMENTO DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA NA BACIA DO RIO
SÃO MARCOS BASEADA NO VALOR ECONÔMICO DA ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, ____ de _____ de _____.

Prof. Dr Guilherme Fernandes Marques - IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Dr Walter Collischonn - IPH/UFRGS
Examinador

Dr. Bruno Collischonn - ANA
Examinador

Dr. Lineu Neiva Rodrigues - EMBRAPA
Examinador

Prof. Dr. Marcelo Olivares - Universidad de Chile
Examinador

Dedico este trabalho à geração e
produção de conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Luiz Henrique Boff e Mara Abel, por todo apoio e incentivo durante esse trabalho, e durante toda a minha vida, ao me darem condições e oportunidades de estudo, que tantos no país não possuem, e sempre oferecendo carinho, compreensão, conselhos e apoio. Sem eles nada disso seria possível.

Agradeço à minha irmã, Ana Carolina Bof, pelo companheirismo, amizade, disponibilidade, parceria, e por ser a melhor irmã que eu poderia pedir.

Agradeço à Karem Vargas, pelo amor, companheirismo, amizade, carinho, compreensão e paciência, tendo ficado ao meu lado do início ao fim deste processo, sempre com palavras de apoio e força nos momentos difíceis, e de tornar tudo mais fácil.

Agradeço ao meu orientador, Guilherme Fernandes Marques, pelos conhecimentos compartilhados, tutoria, paciência, conversas, contribuições e direcionamentos, sem os quais esse trabalho não teria sido possível.

Aos amigos e colegas do curso de Engenharia Ambiental, muitos dos quais ainda são parte importante da minha vida.

Aos amigos e colegas da Profill, que acompanharam de perto este processo, me ajudando nas horas difíceis.

A todos os amigos que, direta ou indiretamente, me ajudaram neste processo.

Ao meu chefe, Sidnei Agra, pelo aprendizado, tutoria e compreensão.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, pela excelência no programa de pós-graduação, a todos os seus professores, pesquisadores e alunos.

Ao CNPq, que me concedeu a bolsa de estudos, essencial para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo ensino gratuito e de qualidade, onde completei meu curso de graduação e pós-graduação.

À toda comunidade científica.

RESUMO

Em vista das suas potencialidades e características, a geração de energia, produção de alimentos e disponibilidade de água possuem um forte nexos de interdependência e correlação. Água é necessária para produzir energia e alimento, assim como a energia é necessária para a produção de água e alimento. A presença desse nexos torna os desafios de manter a produção de alimentos, energia e atendimento às demais demandas hídricas, conectados. Resolver um desafio requer, mais do nunca, conhecer os reflexos nos demais. Ignorar os reflexos, ou *trade-offs*, pode levar a conflitos, perda de investimentos, impactos ambientais, a limitações na eficácia de políticas setoriais e até no comprometimento do próprio modelo de desenvolvimento do país, que depende da segurança hídrica, energética e alimentar. É a partir da identificação destes nexos e dos *trade-offs* envolvidos, que a gestão dos recursos hídricos poderá encontrar soluções que permitam avanços em todos os setores de forma sustentável a longo prazo. Diversos exemplos da literatura apontam para indícios de que os conflitos relacionados à utilização de recursos hídricos são decorrentes não só de sua escassez, mas também da deficiência na gestão desses recursos, e a conclusão formulada recentemente no Fórum Mundial da Água foi de que a crise da água é essencialmente uma crise de gestão. Nesse contexto os instrumentos econômicos de gestão surgem como uma complementação aos modelos tradicionais de alocação de recursos. No Brasil, o principal deles é a cobrança pelo uso da água, porém, diversos atores apontam para a ineficácia do instrumento de cobrança, da forma como ele está sendo implantado, de cumprir seus preceitos conceituais e legais, devido, entre outros motivos, à falta de conhecimento sobre o valor econômico da água e os *trade-offs* entre seus diferentes usos. O presente estudo aborda o problema de usos competitivos entre agricultura irrigada e geração hidrelétrica, decorrente do crescimento recente da agricultura irrigada e da presença de aproveitamentos hidrelétricos conectados ao Sistema Integrado Nacional - cujos usos têm se demonstrado rivais - na bacia hidrográfica do rio São Marcos. O objetivo do trabalho é avaliar os *trade-offs* econômicos entre energia e produção agrícola irrigada na região e mostrar como essa informação poderia contribuir para a alocação negociada da água, a partir do seu valor econômico, comparando com o sistema de alocação atual. É empregado um modelo hidroeconômico de otimização explicitamente estocástico para a determinação do valor econômico da água e suas variações no espaço e no tempo. Os resultados do modelo são empregados na configuração de um instrumento de alocação negociada de água entre os usuários, baseado em uma contabilidade hídrica realizada de forma dinâmica. Os resultados indicam que os *trade-offs* são significativos e que o valor econômico da água varia no tempo e no espaço. Mais importante, simulações das opções de negociação a partir da contabilidade hídrica e do valor econômico da água mostraram que existem soluções com a possibilidade de compensação econômica de perdas entre os setores envolvidos. Essas soluções seriam o ponto de partida para um processo de alocação negociada capaz de: (a) contribuir para desarmar uma situação de conflito entre usos onde os investimentos tanto na geração quanto na produção agrícola já foram feitos e não há água suficiente (b) sinalizar aos usuários atuais e futuros a localização espacial e o padrão de demanda que pode ser acomodado na bacia, em função do valor econômico da água.

Palavras-chave: Economia de recursos hídricos; instrumentos econômicos de gestão; valor marginal da água

ABSTRACT

Because of its potentialities and characteristics energy generation, food production and water availability have a strong nexus of interdependency and correlation. Water is needed to produce energy and food, and energy is also necessary to produce water and food. The presence of this nexus makes the challenges of maintaining food production, energy and attendance to other connected water demands, connected. Solving a challenge requires, more than ever, the knowledge about its reflexes in others. Ignoring the trade-offs can lead to conflicts, loss of investments, environmental impacts, limiting the effectiveness of sectoral policies and even undermining the country's own model of development, which depends on water and energy security. It is from the identification of these links and the trade-offs involved that water resources management can find solutions that allow progress in all sectors to develop in a sustainable way, in the long term. Several examples in literature suggest that conflicts related to the use of water resources stem not only from their scarcity, but also from the lack of management of these resources, and a recent conclusion made at the World Water Forum stated that the water crisis is essentially a management crisis. In this context, economic management instruments appear as a complement to the traditional models of resource allocation. In Brazil, the main one is charging for the use of water, however, several authors point to the ineffectiveness of the instrument to comply with its conceptual and legal precepts, due, among other reasons, to a lack of knowledge about the economic value of water and the trade-offs among their different uses. The present study addresses the competitive uses of irrigated agriculture and hydroelectric generation, due to the recent growth of irrigated agriculture and the presence of two hydroelectric plants connected to the National Integrated energy System, where uses have proved to be rivals, in the São Marcos river basin. The objective of this work is (i) to evaluate the economic trade-offs between energy and irrigated agricultural production in the region; and (ii) to show how this information could contribute to the negotiated allocation of water, based on its economic value, compared to the current allocation system. A hydroeconomic model of explicitly stochastic optimization is used to determine the economic value of water and its variation in space and time. The results of the model are employed in the configuration of a negotiated water allocation instrument among users based on a dynamically performed water accounting. The results indicate that trade-offs are significant and that the economic value of water varies in time and space. More importantly, simulations of trading options based on water accounting and the economic value of water showed that there are solutions with the possibility of economic compensation of losses between the sectors involved. These solutions would be the starting point for a negotiated allocation process capable of two important points: (a) to contribute to defuse a conflict situation between uses where investments in both generation and agricultural production have already been made and there is not enough water; and (b) signal to current and future users the spatial and time distribution of demands that can be accommodated in the basin, depending on the economic value of the water.

Keywords: Water resources economics; economic management instruments; marginal value of water

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Área irrigada no Brasil em 2015	20
Figura 3.1 – Metodologia do trabalho	28
Figura 3.2 - Bacia Hidrográfica do Rio são Marcos	29
Figura 3.3 - Distribuição espaço-temporal do plantio de culturas irrigadas para a simulação na bacia hidrográfica do Rio São Marcos	32
Figura 3.4 - Demandas resultantes de evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio São Marcos ..	34
Figura 3.5 - Mapa da bacia do São Marcos com os dados de interesse	36
Figura 3.6 - Estimativas de potência média mensal gerada nas usinas	38
Figura 3.7 - Comparação dos limites de consumo a montante da UHE Batalha	39
Figura 3.8 - Discretização da bacia em uma rede de arcos e nós.....	41
Figura 3.9 - Evapotranspirações reais espacializadas no sistema São Marcos.....	42
Figura 3.10 - Valor marginal da água no Sistema São Marcos em um dado mês	48
Figura 3.11 - Valor marginal da água no Sistema São Marcos em um dado ano	48
Figura 3.12 - Dados do modelo.....	49
Figura 3.13 - Potência média gerada mensal, para os dois cenários de permanência e arranjos de alocação	53
Figura 3.14 - Curva de permanência para a energia anual média gerada nas UHEs e no sistema	54
Figura 3.15 - Vazão afluyente aos reservatórios a cada mês, para os dois cenários de permanência e arranjos de alocação	55
Figura 3.16 - Curva de permanência para vazão afluyente anual média aos reservatórios	56
Figura 3.17 - Curvas de permanência dos benefícios econômico oriundos da geração de energia elétrica nas UHEs e no sistema.....	57
Figura 3.18 - Vazão retirada para agricultura irrigada a cada mês, para os dois cenários de permanência no arranjo econômico.....	59
Figura 3.19 - Curva de permanência das demandas anuais médias retiradas para irrigação em cada nó, e no sistema	59
Figura 3.20 - Curva de permanência dos benefícios econômicos gerados pela irrigação em cada nó do sistema	61
Figura 3.21 - Valor marginal da água nos nós a cada mês, para os dois cenários de permanência e arranjos de alocação	63
Figura 3.22 - Curva de permanência dos valores marginais médios.....	65

Figura 3.23 - Benefícios mensais médios no sistema nos dois arranjos e dois cenários de permanência	67
Figura 3.24 - Curva de permanência dos benefícios totais anuais médios no sistema.....	68
Figura 4.1 - Medidas para solução e mitigação de crises e conflitos pelo uso da água.....	81
Figura 4.2 - Esquema descrevendo as etapas para alimentação da CHD.....	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Distribuição espaço-temporal do plantio de culturas irrigadas para a simulação na bacia hidrográfica do Rio São Marcos	33
Quadro 3.2 - Valores de precipitação efetiva média mensal e evapotranspiração de referência média mensal de referência utilizados.....	34
Quadro 3.3 - Demandas de evapotranspiração mensal real na bacia hidrográfica do rio São Marcos	34
Quadro 3.4 - Outorgas na bacia do rio São Marcos	37
Quadro 3.5 - Descrição dos nós do sistema	41
Quadro 3.6 - Conjuntos de resultados	51
Quadro 3.7 - Energia gerada anual média para os dois cenários e dois arranjos, em cada UHE e no sistema	55
Quadro 3.8 - Vazão afluente anual média nos dois cenários e dois arranjos	56
Quadro 3.9 - Benefício econômico gerado nos dois cenários e dois arranjos, em cada UHE e no sistema	57
Quadro 3.10 - Demandas, vazões de retirada e déficits anuais para a agricultura irrigada, para os dois cenários de permanência no arranjo econômico	60
Quadro 3.11 - Benefício gerado pela agricultura irrigada nos dois cenários, em cada nó de irrigação	61
Quadro 3.12 - Valores marginais médios.....	66
Quadro 3.13 - Benefícios totais e gerados no sistema nos dois cenários de permanência e dois arranjos de alocação	68
Quadro 3.14 - <i>Trade-offs</i> dos benefícios gerados	69
Quadro 3.15 – Potência média mensal observada gerada na UHE Batalha.....	70
Quadro 3.16 – Valores anuais médios de energia produzidos pelo modelo no arranjo energético, em 50% do tempo	71
Quadro 3.17 - VAB agropecuário municipal e parcela considerada dentro da BHSM	72
Quadro 3.18 - Benefício econômico anual médio gerado pela agricultura irrigada.....	73
Quadro 3.19 - Distribuição da área da bacia nas Unidades da Federação e municípios.....	75
Quadro 3.20 - Área irrigada e número de pivôs centrais por município e por Unidades da Federação na Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos	76
Quadro 3.21 - Informações técnicas e operacionais das UHEs da bacia	77
Quadro 3.22 - Curvas Cota-Área-Volume das UHEs em operação	77
Quadro 3.23 - Preço mensal da energia	78

Quadro 3.24 - Dados econômicos e operacionais das culturas irrigadas	78
Quadro 3.25 - Distribuição das culturas nas unidades de área*mês.....	78
Quadro 3.26 - Distribuição das áreas irrigadas estáticas, por nó, por cultura, no sistema São Marcos	79
Quadro 3.27 - Demandas hídricas unitárias das culturas irrigadas	79
Quadro 4.1 - Transações mensais no mês de maio/02 no cenário de 90% de permanência	92
Quadro 4.2 - Transações mensais no mês de maio/02 no cenário de 10% de permanência	92
Quadro 4.3 - Transações mensais no mês de julho/03 no cenário de 90% de permanência	95
Quadro 4.4 - Transações mensais no mês de julho/03 no cenário de 10% de permanência	95
Quadro 4.5 - Transações mensais no mês de novembro/03 no cenário de 90% de permanência.....	97
Quadro 4.6 - Transações mensais no mês de novembro/03 no cenário de 10% de permanência.....	97
Quadro 4.7 - Transações mensais no mês de abril/04 no cenário de 90% de permanência.....	98
Quadro 4.8 - Transações mensais no mês de abril/04 no cenário de 10% de permanência.....	98
Quadro 4.9 - Balanços mensais da compensação financeira e estrutura ALE para o ano 02	102
Quadro 4.10 - Balanços mensais da compensação financeira e estrutura ALE para o ano 03	103
Quadro 4.11 - Balanços mensais da compensação financeira e estrutura ALE para o ano 04	104
Quadro 4.12 - Balanços anuais da compensação	105
Quadro 4.13 - Valores globais das transações para o Ano 04	105
Quadro 4.14 - Balanço da estrutura ALE corrigido para o Ano 04	107
Quadro 4.15 - Valores marginais e valores unitários após correção	108
Quadro 4.16 - Saldos econômicos finais para o Ano 04.....	108

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	15
2. OBJETIVOS.....	23
3. ARTIGO I – OS TRADE-OFFS NO NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO NA BACIA DO RIO MARCOS	25
3.1. <i>Introdução</i>	25
3.2. <i>Metodologia.....</i>	27
3.2.1. Caracterização da área de estudo.....	28
3.2.2. Usos de recursos hídricos outorgados na bacia	36
3.2.3. Usos competitivos pela água na bacia do Rio São Marcos	37
3.2.4. Formulação do modelo hidroeconômico.....	39
3.2.5. Resolução do problema de otimização e algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE)	43
3.3. <i>Resultados e discussão</i>	51
3.3.1. Dados de saída do modelo hidroeconômico	51
3.3.2. Validação dos resultados.....	69
3.3.3. Análise dos resultados.....	73
3.4. <i>Conclusões</i>	74
3.5. <i>ANEXOS</i>	75
Anexo 3.I - Distribuição de áreas.....	75
Anexo 3.II - Funções de otimização do algoritmo de distribuição espaço-temporal das culturas irrigadas	76
Anexo 3.III - Dados de entrada do modelo detalhados	77
4. ARTIGO II - UMA PROPOSTA DE INSTRUMENTO DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO MARCOS BASEADA NO VALOR ECONOMICO DA ÁGUA 80	
4.1. <i>Introdução</i>	80
4.2. <i>Metodologia.....</i>	85
4.2.1. Aplicação da estrutura ALE (Alocação Negociada Hidro-Econômica) através de um sistema de contabilidade hídrica dinâmica	85
4.2.2. Correção dos balanços através do mecanismo compensatório.....	89
4.3. <i>Resultados e discussão</i>	89
4.3.1. Estrutura ALE (alocação negociada hidro-econômica)	89
4.3.2. Balanço das compensações na estrutura ALE.....	101
4.3.3. Correção dos balanços das compensações na estrutura ALE	105

4.4. Conclusões	109
5. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
6. CONCLUSÃO GERAL.....	113
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1. INTRODUÇÃO GERAL

Segundo a Resolução A/RES/64/292 da 64ª Assembleia Geral da ONU (2010), acesso a água de boa qualidade é essencial para sustentar a vida, um direito humano básico e uma componente fundamental para uma efetiva política de proteção à saúde. Conforme relatório publicado pela ONU-Água (WWAP, 2016), a gestão, infraestrutura e acesso a uma fonte confiável, economicamente viável e segura de água melhoram padrões de qualidade de vida, expandem economias locais e levam a criação de mais empregos e inclusão social. A crescente escassez de água, tanto em parâmetros quantitativos quanto qualitativos, tem sido um problema e uma crescente ameaça ao desenvolvimento, saúde e bem-estar humano, por afetar diretamente setores como segurança alimentar, desenvolvimento industrial e ecossistemas (ICWE, 1992). Essa escassez afeta os setores econômicos e sociais e ameaça a continuidade de recuperação dos recursos naturais.

Diversos fatores contribuem para essa escassez hídrica: presença de demandas crescentes e conflitantes, reduzida disponibilidade temporal e espacial, variabilidade e incertezas climáticas e hidrológicas e, especialmente, limitada capacidade de planejamento e gestão para compatibilizar recursos escassos com demandas múltiplas. Estima-se que, enquanto a população mundial aumentou aproximadamente três vezes no século XX, a demanda por água aumentou quase sete vezes, de 579 km³/ano, em 1900, para 3.973 km³/ano, em 2000, apresentando estimativas de aumentar mais 30% até 2050 (SHIKLOMANOV, 1998). Um relatório da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) estimou que, caso não sejam adotadas novas políticas, em 2050, 3,9 bilhões de pessoas estarão vivendo em bacias hidrográficas com estresse hídrico severo, e que a demanda por água aumentará 55% entre 2000 e 2050, concentradas principalmente nos setores de manufaturas, eletricidade e uso doméstico (OECD, 2012).

O crescimento da demanda se dá em parte pelo consumo para abastecimento humano, devido ao aumento da população e de seu padrão de vida, mas o maior consumo atualmente é destinado à agricultura irrigada, que também representa um tipo de consumo humano, na forma produção de alimentos, sendo este uso responsável por 70% da demanda global de água (FAO, 2007). Segundo o relatório “Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017” da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017a), a irrigação foi responsável, no ano de 2016, por 46,2% de todo o volume de água captada e 67,2% de toda a água consumida no Brasil.

Outro uso de relevância no panorama brasileiro é a geração de energia hidrelétrica. Segundo último inventário realizado pela Eletrobrás, o Brasil possui aproximadamente 250 GW de potencial hidrelétrico, dos quais aproximadamente 40% se transformaram em usinas hidrelétricas operacionais até 2016 (ELETROBRÁS, 2016). A Região Hidrográfica do Paraná, responsável por 60% da geração hidrelétrica brasileira, já apresenta um histórico de conflitos pelo uso da água envolvendo a hidroeletricidade e outros usos (MMA, 2006). A níveis mundiais, a energia hidrelétrica registrou, em 2016, um total de 1.064 GW de capacidade instalada, contribuindo com 16,4% do suprimento mundial de energia elétrica, sendo China, EUA, Brasil, Canadá, Índia e Rússia os principais geradores (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016).

No Brasil, em vista da matriz predominantemente hidrelétrica, o uso da água para a geração de energia é de grande importância para a segurança energética do país: 64,5% da capacidade instalada de geração de energia elétrica é atribuída às usinas hidrelétricas, que forneceram 68,1% de toda a eletricidade consumida no país em 2016. Por outro lado, o setor agropecuário consumiu 4,8% do total de 619,7 TWh de eletricidade produzida em 2016 (EPE, 2017). Tal cenário aponta para um forte nexo de interdependência e correlação entre a água, a geração de energia e a produção de alimentos no Brasil e suscita desafios para o desenvolvimento do país. A desconsideração do nexo e a falta de uma gestão verdadeiramente integrada tende a ignorar os *trade-offs* e limitar severamente a eficácia de políticas setoriais, uma vez que ganhos adquiridos com uma determinada política (ex: segurança energética com a expansão do parque gerador hidrelétrico) podem ser contrabalançados por perdas de oportunidade para expansão da agricultura irrigada, desenvolvimento de vias navegáveis e proteção de serviços ecossistêmicos, dentre outros. É importante destacar que a presença do nexo não significa que avanços nos setores de energia, produção de alimentos e atendimento a outras demandas hídricas sejam necessariamente mutuamente excludentes. É justamente a partir da identificação do nexo e dos *trade-offs* que a gestão dos recursos hídricos poderá encontrar soluções que permitam avanços em todos os setores de forma sustentável a longo prazo.

O uso da água para a geração hidrelétrica pode apresentar características de rivalidade com demais usos em função da sazonalidade da operação dos reservatórios e das características das demais demandas. Caso uma cultura irrigada necessite de água no mesmo momento em que o operador do reservatório deseje aumentar o volume armazenado, e não restar água suficiente para o usuário agrícola, haverá rivalidade entre os usos. Na medida em que a água é alocada para um desses usos, a energia que deixará de ser gerada, ou a eventual redução na produção agrícola, irão resultar em *custos de oportunidade*. O primeiro passo na busca pelo uso eficiente da água é a avaliação destes custos.

Amorim, Ribeiro e Braga (2016) afirmam que os conflitos relacionados à utilização dos recursos hídricos são decorrentes não só de sua escassez, mas também da deficiência na gestão desses recursos, e citam diversos casos de conflitos pelo uso da água em bacias brasileiras, nas bacias do Piranhas-Açu, São Marcos, rio São Francisco, PCJ e Paraíba do Sul, abordando também as soluções tomadas nessas bacias para a resolução dos conflitos, em geral na forma de um marco regulatório ou convênio entre os comitês envolvidos nos conflitos.

No Estado do Ceará um caso de conflito entre agricultura e abastecimento humano, nas bacias dos rios Jaguaribe e Banabuiú, envolvendo rizicultura e hortifruticultura de baixa eficiência, foi solucionado através de um sistema de compensação financeira aos rizicultores que renunciassem a metade da sua área cultivada, cobrança pelo uso da água para irrigação, capacitação e treinamento para difusão de tecnologias mais eficientes de irrigação, e regularização dos usos através da fiscalização e outorga, em um projeto denominado “Plano de Uso Racional da Água para Irrigação nos Vales do Jaguaribe e Banabuiú”, conhecido popularmente como projeto “Águas do Vale” (ANA, 2018).

Outro exemplo, no Estado do Espírito Santo, onde a crise hídrica ocorrida no biênio 2015-2016 motivou a criação de um Comitê Hídrico Governamental que estabeleceu diversas ações integradas

para lidar com a crise no estado, incluindo suspensões de outorgas, recuperação de nascentes, construção de reservatórios, políticas de incentivo a reuso de água, e um Acordo Específico de Cooperação Comunitária, que focou em normas regulando o uso da água no ramo industrial, enquanto estivesse vigorando o estado de alerta (PEDROSA, 2017).

É nesse contexto de conflitos que os instrumentos econômicos de gestão têm surgido como uma complementação aos modelos tradicionais de alocação de recursos, com seus fundamentos presentes nos Princípios de Dublin (ICWE, 1992), posteriormente no Fórum Mundial da Água (GWP, 2000), e na Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), como observado no instrumento da cobrança pelo uso dos recursos hídricos.

Enquanto instrumento de gestão de recursos hídricos, cabe à cobrança pelo uso da água a importante função de sinalizar ao usuário a escassez e criar condições para aumentar o uso racional e a alocação economicamente eficientes. Além desse aspecto, a cobrança pode ainda contribuir com recursos que, se empregados de forma inteligente em estratégias de financiamento, podem ajudar a alavancar recursos necessários para diversas ações no âmbito da gestão dos recursos hídricos. Segundo Griffin (2006), no entanto, estabelecer preços adequados é um objetivo complexo, que exige esforço, e de todas as ferramentas disponíveis para resolver problemas de escassez, a utilização de preços adequados é a mais subutilizada, em relação aos seus potenciais .

A cobrança pelo uso da água teve a sua implantação no Brasil prevista na Lei 9.433/97, com a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH), que estabelece a cobrança como instrumento de gestão e dá suas diretrizes gerais. No Estado do Ceará a cobrança existe desde 1996, porém ocorre de forma diferente do que é preconizado na PNRH, servindo como uma tarifa para manutenção de infraestrutura hídrica. Sua implantação se deu efetivamente, conforme os preceitos definidos na Política, na bacia do rio Paraíba do Sul, em 2003, que foi a experiência piloto para o início da cobrança pelo uso da água no Brasil. O relatório “Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos no Brasil: Caminhos a Seguir” (OCDE, 2017) agrupa os comitês de bacias hidrográficas interestaduais e os estados, segundo sua condição ou época de implantação da cobrança, nas seguintes categorias: “pioneiros¹”, “seguidores²”, “inspiradores³”, “recém-chegados⁴” e “aspirantes⁵”, sendo os pioneiros os primeiros a implantar a cobrança, os seguidores aqueles de maior complexidade, onde a discussão se deu por muito tempo antes da implantação propriamente dita, os inspiradores os que possuem uma longa experiência e uma implantação diferenciada, dado um singular caso institucional, os recém-chegados aqueles onde a implantação da cobrança é recente, e por fim, os aspirantes, que ainda estão na fase de discussão para a implantação da cobrança.

Nos anos subseqüentes à implantação na bacia do Paraíba do Sul, seguiu-se a implantação nos rios de domínio da União das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ), do rio São Francisco,

¹ Paraíba do Sul, PCJ, Estado do Rio de Janeiro

² São Francisco, Estados de São Paulo e Minas Gerais

³ Estado do Ceará

⁴ Rio Doce, Paranaíba, Verde Grande, Estados do Paraná e Paraíba

⁵ Piancó-Piranhas-Açú, Estado do Rio Grande do Norte

do rio Doce, do rio Paranaíba e do rio Verde Grande. Em rios de domínio do Estado, podem ser citados diversos: em todas as bacias do Estados do Rio de Janeiro, Estado de São Paulo (bacias afluentes ao rio Tietê, bacias da Baixada Santista, dos rios Ribeira de Iguape e Litoral Sul), Estado de Minas Gerais (bacias afluentes aos rios Piracicaba e Jundiá, bacias afluentes ao rio Doce e ao rio Paraíba do Sul, bacia do rio das Velhas, bacia do rio Pará e bacia do rio Araguari), Estado do Paraná (bacias do Alto Iguaçu e afluentes do Alto Ribeira) e Estado da Paraíba (bacias do Litoral Norte, Paraíba e Litoral Sul). Ainda cabe citar experiências semelhantes à cobrança, mas que diferem em alguns aspectos técnicos, nos Estados do Ceará, Bahia, Distrito Federal e Pará (ANA, 2017b).

No entanto, diversas limitações ainda persistem nos modelos de cobrança implementados no Brasil. Segundo apresentado em OCDE (2017), as principais limitações incluem:

- Baixos valores unitários, não indexados pela inflação e mantidos no mesmo nível desde sua implantação;
- Homogeneidade dos valores em bacias heterogêneas;
- Foco exclusivo em arrecadação e financiamento de projetos;
- Valores demasiado baixos para influenciar no comportamento dos usuários;
- Falha em alcançar os montantes necessários de receita de acordo com as necessidades financeiras das entidades e da gestão de recursos hídricos como um todo;
- Falha em refletir a escassez geográfica relativa ou escassez temporal localizada em períodos de seca;
- Falha em refletir os custos de oportunidade do uso da água e as consequências das externalidades do uso e da poluição.

Hartmann (2010) afirma, ainda, que os mecanismos utilizam a cobrança exclusivamente como instrumento arrecadatório, visando cobrir os custos de infraestrutura hídrica ou do planejamento hídrico, o que torna a função do instrumento a de repassar aos usuários os custos desse planejamento e da infraestrutura, e muitas vezes nem isso. Em nenhum local do Brasil essa cobrança é realizada com o intuito de servir como um sistema de incentivos para redução do uso.

Em outras palavras, a cobrança, na sua condição atual, não reflete conceitos como o valor marginal da água (TILMANT; PINTE; GOOR, 2008), nem funciona como uma ferramenta para internalizar as externalidades - efeitos que o uso do recurso por um indivíduo pode causar sobre os usos de outro. Não apenas no Brasil, mas a nível internacional, há evidências de que a água é subprecificada, visto que a demanda frequentemente é superior à quantidade, geralmente levando a um uso insustentável dos recursos hídricos. Se corretamente gerenciado e implementado, esse instrumento tem potencial para promover eficiência econômica e equidade social (ROGERS; DE SILVA; BHATIA, 2002).

OCDE (2017) conclui afirmando que o processo participativo de implantação da cobrança, que passa pelos comitês de bacia, pode ser contrariado por interesses adquiridos, em um contexto onde as agências governamentais tem pouca ou nenhuma responsabilidade no processo, além da participação, e os comitês se tornam locais de resistência, onde os usuários ou entidades mais proativas tendem a

se opor à cobrança e bloquear as mudanças, preservando o *status quo* existente. Isso é natural, visto que os usuários, em geral, não têm interesse em novas cobranças, ou aumento dos valores já cobrados, e não veem resultados advindos do uso dos recursos financeiros obtidos com o instrumento. É por isso que seria necessário um processo de tomada de decisão, e um funcionamento do mecanismo, que tornem mais claros os benefícios aos usuários, e neutralizem a captura da decisão por um grupo influente, sendo uma maneira de fazer isso uma mudança no processo decisório que torne os comitês uma entidade mais consultiva, e menos deliberativa. Os governos federais e estaduais deveriam seguir as recomendações dos órgãos colegiados, ou fornecerem explicações e justificativas embasadas, caso não o façam, e as entidades delegatárias de função de agência deveriam atuar de forma coordenada para implementar a cobrança a nível estadual e da União, podendo inclusive ser criada uma única agência de água para as bacias interestaduais.

Assim, levando em consideração a condição desse instrumento de gestão na prática e na estrutura institucional brasileira, e de sua importância como instrumento de gestão, verifica-se a necessidade de métodos e abordagens para implementar instrumentos econômicos de gestão – como a cobrança - que tragam mais flexibilidade e opções aos usuários, em complemento às abordagens focadas exclusivamente no pagamento de um preço público unitário previamente fixado. A utilização do valor econômico da água e sua variação no espaço e no tempo é um outro aspecto que também deve ser explorado (PULIDO-VELAZQUEZ; ALVAREZ-MENDIOLA; ANDREU, 2013). Observa-se com exemplos de soluções de conflitos, que raramente são utilizados instrumentos econômicos para solucioná-los, e que esta solução sempre vem após a situação de conflito estar instalada, sem planejamento prévio, e em geral através de uma pactuação pautada no âmbito dos comitês de bacia, que sofre com os problemas já mencionados.

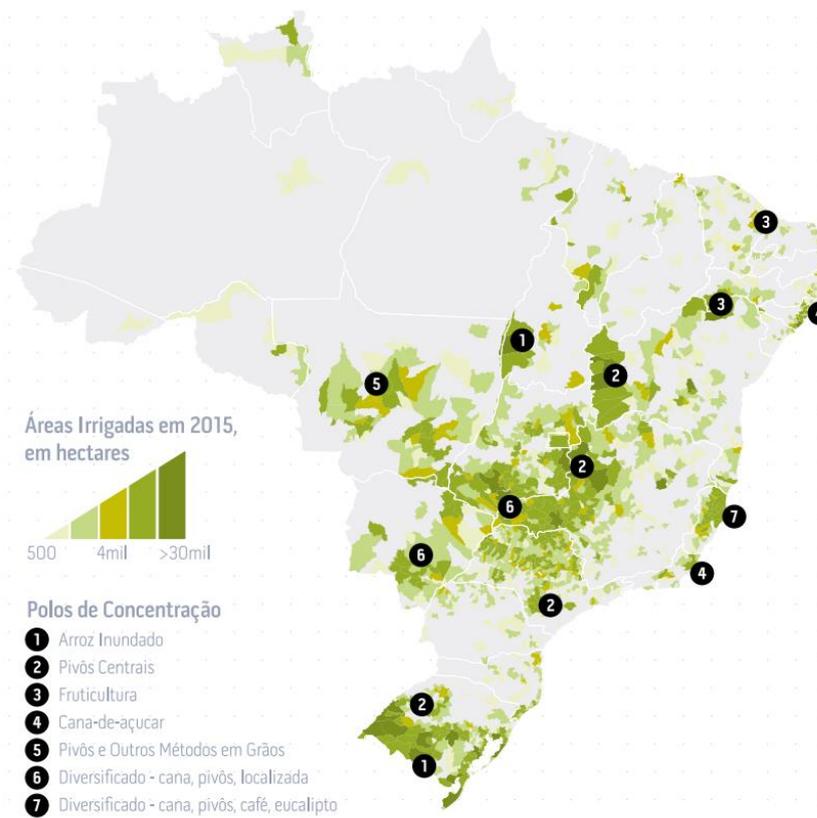
Esse trabalho busca preencher essas lacunas elaborando uma proposta de instrumento que parte de um conceito já implementado no Brasil (alocação negociada), porém aprimorado com elementos econômicos que sinalizam a escassez da água no tempo e no espaço para os usuários. Entretanto, observando-se a conjuntura institucional brasileira, é necessário que o instrumento também forneça incentivos para garantir a manutenção das atividades produtivas sem uma ruptura no contexto socioeconômico e institucional das bacias hidrográficas, e esteja em consonância com os dispositivos legais adequados que regem o modelo de gestão de recursos hídricos no Brasil.

A área de estudo desse trabalho é a bacia hidrográfica do rio São Marcos. A bacia possui uma situação de usos competitivos entre agricultura irrigada e geração hidrelétrica, decorrente do crescimento recente da agricultura irrigada e da presença de dois aproveitamentos hidrelétricos conectados ao Sistema Integrado Nacional (SIN). Segundo o planejamento da expansão do setor elétrico brasileiro, desde meados da década de 60 a bacia do São Marcos é tida como área de aproveitamento hidrelétrico (ANA, 2014). O uso competitivo entre ambas as demandas envolve:

- A geração de energia hidrelétrica, marcada pela construção da Usina Hidrelétrica de Batalha no Rio São Marcos, que veio a complementar a demanda já existente da UHE Serra do Facão, localizada mais a jusante no rio, ambas com reservatório dotado de capacidade de regularização sazonal de vazões;

- A expectativa de agricultores irrigantes, instalados e que virão a se instalar, em expandir a área irrigada com aumento das captações e das vazões demandadas, que o fazem sem um projeto global de ocupação ou um planejamento integrado, em uma região que é considerada especialmente adequada para a produção de sementes, grãos e hortícolas de alto valor agregado.

No Relatório de Conjuntura 2017 (ANA, 2017a), foi feito um mapa dos usos de agricultura irrigada no Brasil, e a bacia do São Marcos figura como um dos polos de concentração de irrigação por pivô central, apresentado na Figura 1.1.



Fonte: ANA (2017a)

Figura 1.1 - Área irrigada no Brasil em 2015

Segundo o mapa da figura, a bacia corresponde ao maior polo de concentração de pivôs do Brasil, com mais de 30 mil hectares irrigados.

Além disso, em mapeamento da situação de balanço hídrico realizada nesse mesmo relatório, a bacia do São Marcos figura como uma em situação de criticidade. No Relatório “Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil - Informe 2014: Especial Crise Hídrica” publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2015), a bacia do São Marcos também é destacada como uma em situação crítica em relação à oferta e demanda hídrica, demonstrando que a situação de criticidade possui ao menos alguns anos de duração.

Em Nota Técnica publicada pela ANA em 30 de agosto de 2010 - “Nota Técnica nº 103/GEREG/SOF-ANA - Considerações sobre valor econômico da água na bacia do rio São Marcos” -

é afirmado que a expansão verificada pela irrigação sinaliza para um aumento da vazão captada a montante da UHE Batalha, em detrimento da geração de energia, e que não existe fundamento legal imediato para definir a prioridade, seja na forma de leis ou de planos de recursos hídricos (ANA, 2010b).

Em outra Nota Técnica publicada pela ANA, também em 30 de agosto de 2010 - “Nota Técnica nº 104/2010/GEREG/SOF-ANA - Subsídios à elaboração de Marco Regulatório na bacia do rio São Marcos” -, é mencionado que o conflito potencial entre irrigação e geração de energia hidrelétrica já havia sido sinalizado antes, pela NT 215/2008 GREG/SOF/ANA, que identificou que apenas as outorgas nos rios federais da bacia (Samambaia e São Marcos) já ocupariam toda a vazão de usos agrícolas prevista para 2010. É afirmado, ainda, que o conflito não tem caráter hidrológico, e sim econômico e regulatório, e são levantadas duas possíveis soluções para compatibilizar o consumo de água para irrigação com a reserva de disponibilidade para a geração hidrelétrica:

- a) Reduzir, através de campanhas de repressão aos pivôs irregulares, marcos regulatórios com os estados e outros instrumentos de restrição, o consumo a montante da UHE, até que este seja igual ao previsto na DRDH (Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica). Isto implicaria em proibir o funcionamento de mais de 45.000 hectares de pivô central, com evidentes consequências para a economia de Cristalina, Paracatu, Unaí e do DF;
- b) Revisar a DRDH de forma a ampliar a vazão reservada para usos consuntivos, com possível reavaliação, por parte da ANEEL, de aspectos energéticos (ANA, 2010c).

Afirma-se, ainda, que há uma preferência pela alternativa (b), para evitar os prejuízos citados na primeira opção, mas ressalta-se que essa opção gerará uma restrição ao crescimento do consumo em relação aos níveis atuais, para não vir a prejudicar ainda mais a geração de energia elétrica. Como visto, a escolha por uma ou outra alternativa irá produzir *trade-offs* em vista dos custos de oportunidade da água. A falta de conhecimento destes gera riscos de implementar soluções e investimentos que resultam em uma distribuição desigual de custos e benefícios, nesse caso, melhoria na oferta de energia às custas de restrições no aproveitamento agrícola ou ainda aumento na produção agrícola e mercados regionais às custas do comprometimento e falta de segurança nos investimentos na geração de energia.

A situação de uso competitivo pela água motivou a criação de um marco regulatório do uso da água pela Agência Nacional de Águas, realizado a partir dos estudos realizados nas notas técnicas citadas, que limitou a vazão máxima a ser consumida pela irrigação a montante da UHE Batalha em 8,7 m³/s, visando respeitar os limites previstos de outorga para o setor elétrico. A partir desse valor de vazão média, pode se chegar a um valor de Área Irrigada Equivalente pelo Método de Pivô Central (AIEPC), que converte vazão em área irrigada. A ANA definiu a AIEPC equivalente limite igual a 33.500 ha para Goiás e a 30.000 ha para Minas Gerais (ANA, 2010), que representam valores médios regionais de vazão considerando as variáveis climáticas da bacia. O mapeamento da agricultura irrigada realizado pela ANA e EMBRAPA (2014) aponta que já há pelo menos 70 mil hectares irrigados nessa região, ultrapassando o limite estabelecido.

Considerando a possibilidade de soluções alternativas àquelas propostas na “Nota Técnica nº 104 /2010/GEREG/SOF-ANA - Subsídios à elaboração de Marco Regulatório na bacia do rio São

Marcos” (ANA, 2010c) o presente trabalho vem propor um instrumento que auxilie no processo de negociação entre os usuários e seja útil na busca de soluções de alocação mais eficientes economicamente na bacia do rio São Marcos. Tais soluções evitam uma redução drástica nas outorgas adquiridas pelos setores de agricultura ou hidrelétrica, procurando realizar uma transição gradual para uma alocação mais eficiente.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi responder às seguintes perguntas:

“É possível identificar uma proposta de alocação negociada da água a partir do seu valor econômico? Quais as vantagens dessa proposta sobre a alocação atual?”

Para responder a essas perguntas, o presente trabalho inicia com uma avaliação dos *trade-offs* entre agricultura irrigada e geração hidrelétrica na bacia alvo de estudo, a partir de um modelo hidroeconômico de otimização. Em seguida, o modelo é utilizado para a determinação do valor econômico da água e sua variação no espaço e no tempo, que são empregados na configuração de um instrumento de alocação negociada da água entre os usuários.

O desenvolvimento do trabalho e apresentação dos resultados é feito na forma de dois artigos. O primeiro organiza as informações necessárias e elabora uma análise dos *trade-offs* entre os diferentes usos da água na bacia. O segundo utiliza essas informações para exemplificar e lançar as bases conceituais para um instrumento econômico que:

- (i) Leve em consideração o valor econômico da água;
- (ii) Internalize as externalidades econômicas geradas no uso dos recursos hídricos por um usuário a outros usuários;
- (iii) Incorpore um sistema de incentivos que estimule a racionalização e eficiência no uso da água e contribua para a viabilidade dos empreendimentos dependentes dos recursos hídricos;
- (iv) Identifique soluções de alocação economicamente eficiente da água dentro da bacia;
- (v) Leve em consideração a variação na disponibilidade hídrica (e por conseguinte na escassez) no tempo e no espaço, bem como seus reflexos no valor marginal e custos de oportunidade da água na bacia.

Esse instrumento será denominado ALE (*Alocação Negociada Hidroeconômica*) baseado em um procedimento de contabilidade hídrica dinâmica a exemplo do apresentado em Tilmant; Marques; Mohamed (2015). A sua aplicação irá requerer uma estrutura institucional e regulatória que permita aos usuários transacionar quotas de uso dos recursos hídricos em troca de compensações financeiras, ou pagar pelo uso dos recursos hídricos a partir do valor do recurso em um dado momento em um dado local. A quantidade de quotas passíveis de transação deverá ser definida em acordo envolvendo os comitês de bacias, os conselhos estaduais de recursos hídricos, o conselho nacional de recursos hídricos, a ANEEL e os órgãos gestores estaduais e federal (ANA). Um maior detalhamento institucional desse arranjo encontra-se fora do escopo do presente trabalho. Entretanto o modelo proposto e os resultados deverão contribuir para aprimoramentos futuros.

Essa estrutura visa funcionar como um instrumento que venha a desenvolver o atual paradigma dos instrumentos econômicos de gestão no Brasil - como a cobrança pelo uso da água, e o mais recentemente proposto pelo PL n° 495, de 2017 (BRASIL, 2017), que visa instituir os mercados de água

como instrumento de gestão - e que reflita o valor marginal da água e suas variações no espaço e no tempo, ao contrário de apenas um valor fixo e estático. O valor marginal do custo de oportunidade da água, descrito em Pulido-Velazquez; Alvarez-Mendiola; Andreu (2013) é o indicador a ser utilizado para definir esse valor marginal e suas variações.

Com a estrutura da ALE (Alocação Negociada Hidroeconômica) pretende-se:

- (i)** Identificar soluções de alocação que resultem em aumento do benefício total do sistema - bacia hidrográfica - através da alocação eficiente de água na bacia, conforme o valor marginal de oportunidade;
- (ii)** Propor um sistema de informações para comunicar as soluções de alocação aos usuários e criar a possibilidade de realizar alocação negociada ao nível individual;
- (iii)** Estruturá-lo de forma a não causar uma ruptura institucional muito grande que venha a lesar determinados usuários, em conformidade com os princípios de equilíbrio social, econômico e ambiental;
- (iv)** Propor alternativas que estejam em conformidade com a atual legislação brasileira, que veta a compra e venda direta de outorgas, criação de mercados de água e mercantilização dos direitos de uso, logo, estruturar o mecanismo de forma a permitir as transações de maneira indireta;
- (v)** Propor uma possível alternativa local ao atual instrumento de alocação negociada que tem sido utilizada no Brasil, operando através de um sistema de incentivos que torne interessante para os usuários, a nível individual, se engajar no sistema;
- (vi)** Sinalizar o real valor econômico da água na estrutura proposta, de forma a alocar o recurso de forma eficiente e conscientizar os usuários de que o recurso é dotado de valor econômico, finito e escasso.

A estrutura do instrumento ALE será exemplificada, utilizando como área de estudo a bacia hidrográfica do rio São Marcos, e irá investigar soluções para um cenário de usos competitivos entre agricultura irrigada e geração hidrelétrica que sejam mutuamente benéficas para os usuários da bacia.

Com a aquisição de informações necessária para a implantação desse instrumento e um exemplo de sua aplicação pretende-se fornecer subsídios para o entendimento de como se dá a geração de benefícios econômicos nos diferentes usos da água em uma bacia com usos competitivos, e de como um modelo de alocação negociada pode contribuir para a solução de conflitos e maior eficiência econômica nos usos dos recursos hídricos.

3. ARTIGO I – OS TRADE-OFFS NO NEXO ÁGUA-ENERGIA-ALIMENTO NA BACIA DO RIO MARCOS

3.1. Introdução

A atual conjuntura de crises causadas por conflitos pelo uso de água (ANA, 2015, 2017a, 2018; OECD, 2012, 2015, 2017; AMORIM, RIBEIRO e BRAGA, 2016; PEDROSA, 2017) sugere a necessidade de aprimoramento constante das ferramentas de gestão para garantir a sua efetividade em um contexto de demandas, comportamento de usuários e de sistemas hidrológicos e ambientais muito dinâmicos. Um fator importante para compreender os problemas de escassez de água é a conclusão formulada no Fórum Mundial da Água, de que a crise da água é essencialmente uma crise de gestão, e conseqüentemente a governança da água é uma das grandes prioridades de ação para superar a crise hídrica (GWP, 2000).

Diversos estudos apontam para a importância do nexo entre água, energia e produção de alimentos (GIAMPIETRO et al., 2013; FAO, 2014a, 2014b; UNECE, 2016; UN WATER, 2017). Atualmente, 70% do consumo hídrico global é voltado para agricultura (FAO, 2016), e o setor consome em sua cadeia de produção 30% da oferta global de energia (WWAP, 2012). Paralelo a isso, 90% da energia gerada globalmente exige água na sua geração, com o setor energético tendo sido responsável, em 2010, por uma demanda de 583 bilhões de metros cúbicos, que representa 15% da demanda global de água (WWAP, 2014).

No Brasil, uma das maiores lacunas para o adequado gerenciamento de recursos hídricos é a falta de informações e conhecimento a respeito das reais disponibilidades, demandas e usos de água, bem como das conseqüências e reflexos (positivos e negativos) quando recursos hídricos escassos precisam ser alocados a demandas abundantes e competitivas. Embora a Política Nacional de Recursos Hídricos traga em seu cerne o reconhecimento do valor econômico da água como um dos fundamentos para a gestão, tal aspecto ainda é largamente ignorado pelos instrumentos econômicos implementados no Brasil (e em boa parte do mundo). Como resultado, a alocação de água segue sendo feita de forma míope, quando a água é abundante (aloca-se a água hoje, sem saber as conseqüências dessa decisão para as gerações futuras) ou meramente regulatória, quando a água é escassa (aloca-se a água para usos prioritários previstos em lei, determinando-se a imediata suspensão dos demais usos em situações de crise). Em ambos os casos, os incentivos ou alternativas para que os usuários busquem o uso mais eficiente são limitados. Dentre dois importantes instrumentos com potencial de definir a alocação de água no Brasil (outorga e cobrança pelo uso de água bruta), a cobrança, não obstante em processo de implantação gradual e de amadurecimento no Brasil, ainda esbarra em limitações no que se refere à acessibilidade e avaliações de impacto, e o instrumento é visto majoritariamente sob o ponto de vista arrecadatório e de finanças públicas (OECD, 2015).

Nesse contexto, a discussão e negociação em situações de conflito sem um bom conhecimento sobre os *trade-offs*, que determinam o nexo água-energia-alimento, torna difícil prever qual o impacto da solução adotada nos diversos elementos do nexo. Por outro lado, em situações onde o conflito ainda não se desenvolveu, é impossível verificar se decisões ou políticas setoriais atuais estão colocando um

elemento do nexu em rota de colisão com outro em um futuro próximo, que impeça que a gestão dos recursos hídricos seja de fato integrada.

O cálculo de *trade-offs* no nexu água-energia alimento demanda uma representação não apenas dos elementos do nexu (geração de energia e produção agrícola) e dos benefícios associados, mas também do elo entre esses elementos estabelecido pelos fluxos de água no sistema. Métodos e ferramentas de análise sistêmica, envolvendo modelos de simulação e otimização para representar sistemas hídricos de forma integrada e permitir a avaliação e comparação de diferentes estratégias operacionais e instrumentos de gestão já eram propostos em Maass et al. (1962), envolvendo aspectos econômicos, ambientais e sociais. Já o uso de otimização combinando engenharia e conhecimentos econômicos data do trabalho de Wellington (1887), que aplicou a otimização na escolha da localização da malha ferroviária para reduzir custos e aumentar a eficiência do sistema. Desde então, cada vez mais conceitos econômicos têm sido aplicados à engenharia, gerenciamento de sistemas e de infraestrutura, começando com Dupuit e Navier, até os trabalhos mais contemporâneos de Maass, et al. (1962) no Programa de Água de Harvard, e nos Departamentos de Geografia e Engenharia Ambiental da Universidade de Cornell nos anos 80 (LUND; CAI; CHARACKLIS, 2006).

Recentemente, a utilização da modelagem de processos como ferramenta para a gestão de recursos hídricos - utilizando a otimização como o elo entre a economia e a engenharia e procurando utilizar princípios econômicos para auxiliar na tomada de decisão, buscando o gerenciamento integrado e flexível, beneficiando o planejamento e avaliações alternativas da utilidade da água como recurso - pode ser observado nos trabalhos de Griffin (1998, 2006, 2008), Braden (2000), Brouwer; Hofkes (2008), Pulido-Velazquez et al. (2008), Tilmant; Pinte; Goor (2008), Harou et al. (2009), Gjelsvik et al. (2010), Zhu; Van Ierland (2012), Pulido-Velazquez; Alvarez-Mendiola; Andreu (2013), Macian-Sorribes; Pulido-Velazquez; Tilmant, (2014), Tilmant; Marques; Mohamed (2015), Arjoon; Tilmant; Herrmann (2016).

Aplicações semelhantes à utilizada aqui podem ser observadas nos trabalhos descritos a seguir:

Tilmant; Pinte; Goor (2008) utilizaram uma abordagem semelhante à desse trabalho, com o mesmo algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) que será utilizado, para avaliar *trade-offs* de transferências de água entre agricultura irrigada e geração de energia na bacia hidrográfica do rio Eufrates, que abrange a Turquia e a Síria.

Goor (2010) aplicou metodologia semelhante (também através do algoritmo de PDDE) para avaliar a operação otimizada de reservatórios em um sistema com geração de energia e agricultura irrigada na bacia hidrográfica do rio Nilo, no Egito.

Marques; Tilmant (2013) avaliaram o benefício econômico em coordenar a operação de diversos reservatórios de grande escala no rio Paraná utilizando algoritmo de PDDE.

Jafarzaghan; Abed-Elmdoust; Kerachian (2014) utilizaram um algoritmo de Programação Dinâmica Estocástica para avaliar a operação otimizada do uso conjunto de água superficial e subterrânea em um sistema interbacias.

Raso; Malaterre; Bader (2018) utilizaram algoritmo de PDDE para definir a operação otimizada do reservatório de Manantali, no rio Senegal.

Machado (2009) realizou uma análise econômica entre os usos de agricultura irrigada e geração de energia hidrelétrica na bacia hidrográfica do rio Preto. A comparação foi baseada em dados secundários e as funções de produção de benefício econômico de cada uso, e a alocação de água realizada através do modelo Aquanet.

FGV (2003) caracterizou as atividades econômicas baseadas no uso de recursos hídricos na bacia do rio Paraíba do Sul visando fornecer subsídios para a implantação da cobrança pelo uso da água e seus impactos sobre as atividades do setor agropecuário, industrial e hidrelétrico.

Embora trabalhos envolvendo modelagem hidroeconômica vem se tornando cada vez mais comuns, o seu emprego no estudo de *trade-offs* nonexo água-energia-alimento para o embasamento de políticas setoriais e resolução de conflitos ainda contém diversas lacunas, especialmente em relação às incertezas hidrológicas e aos resultados. Este artigo traz uma contribuição para a área de conhecimento ao avaliar esses *trade-offs* entre a agricultura irrigada e geração hidrelétrica, em uma bacia hidrográfica onde já existe um conflito instalado, com emprego de uma abordagem de otimização explicitamente estocástica. Os benefícios e a utilidade de se conhecer os *trade-offs* incluem (a) possibilidade de identificar quais os reflexos de uma decisão de alocação nos demais elementos do nexo e assim evitar decisões ruins; (b) criar condições para a gestão integrada de recursos hídricos e a sua compatibilização com outras políticas setoriais (exemplo: agricultura irrigada e expansão da geração energética) e (c) criar condições para instrumentos de compensação econômica, que facilitaram a aceitação de uma determinada solução e reduziram a possibilidade de conflitos demorados.

3.2. Metodologia

Para a identificação de *trade-offs*, a metodologia parte da avaliação de usos da água na bacia e sua representação em um modelo hidroeconômico capaz de calcular os benefícios potenciais produzidos. A área de estudo foi definida como a bacia hidrográfica do rio São Marcos. A metodologia segue o fluxo descrito na Figura 3.1.

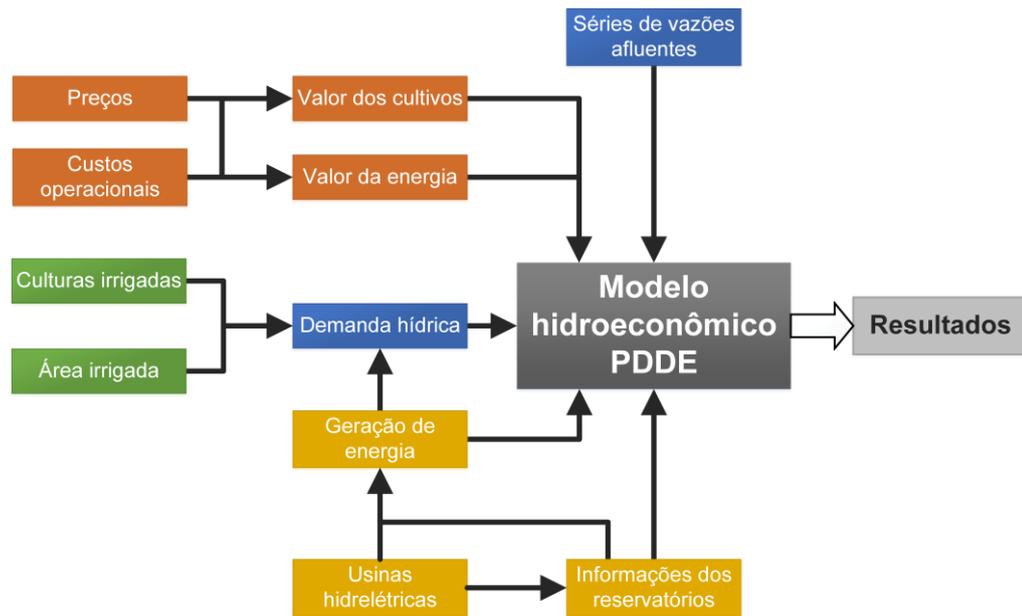


Figura 3.1 – Metodologia do trabalho

Os dados necessários são o uso agrícola irrigado e geração de energia na bacia, incluindo informações financeiras e operacionais desses usos, caracterização hidrológica da bacia e aspectos físicos. O modelo hidroeconômico emprega um algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE) (GOOR et al., 2010), configurado para representar diferentes arranjos dos usos na bacia, considerando a incerteza do comportamento hidrológico de forma explícita. Por fim, os dados obtidos a partir da modelagem serão analisados e interpretados, apresentando as informações sobre os *trade-offs* dos diferentes usos.

3.2.1. Caracterização da área de estudo

3.2.1.1. Caracterização geral

A bacia hidrográfica do rio São Marcos está localizada na divisa dos estados de Minas Gerais, Goiás e do Distrito Federal, dentro da Região Hidrográfica do Rio Paraná, cuja localização é apresentada na Figura 3.2

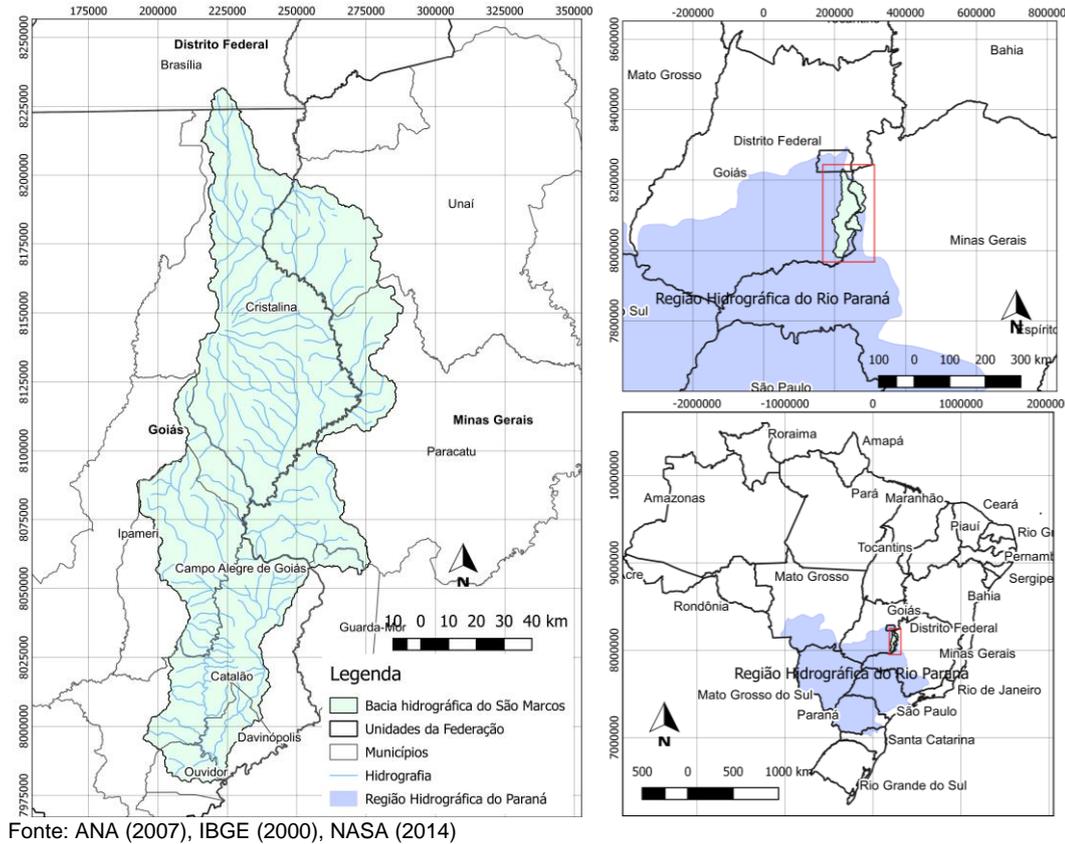


Figura 3.2 - Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos

A bacia possui uma área de 12.089 km², abrangendo áreas de dez municípios e do Distrito Federal: Brasília (DF), Campo Alegre de Goiás (GO), Catalão (GO), Cristalina (GO), Davinópolis (GO), Ipameri (GO), Ouvidor (GO), Guarda-Mor (MG), Paracatu (MG) e Unai (MG) (Quadro disponível no Anexo 3.I). Os dados de área da bacia foram gerados a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado pelo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução espacial de 30 metros (NASA, 2014) a partir do qual se gerou a rede de drenagem e se delimitou a bacia hidrográfica utilizando a ferramenta IPH Hydro Tools (SIQUEIRA, et al., 2016). Os dados de área dos municípios foram obtidos a partir da base de dados do IBGE (2000). O processamento foi realizado no software ArcGIS (ESRI, 2013).

Quanto à hidrografia, o mais importante rio da bacia é de nome homônimo, rio São Marcos, que nasce⁶ no norte do estado de Goiás, próximo à divisa com o Distrito Federal, e segue em direção sul como divisa entre os estados de Minas Gerais e Goiás por aproximadamente 150 km para desaguar no rio Paranaíba, que passa a ser o divisor dos estados de MG e GO. Tem como tributário o rio Samambaia, cuja nascente é o ponto mais a montante da bacia, dentro do Distrito Federal. Pode-se citar ainda o rio São Bento, rio Batalha e o ribeirão do Cristal, seus maiores tributários.

Vale ressaltar ainda, que os rios Samambaia e São Marcos, por se localizarem na, ou cruzarem a, divisa dos estados, são rios de domínio da União, cuja gestão compete à Agência Nacional de Águas.

⁶ A rigor, segundo a base de dados de hidrografia da ANA, o Rio São Marcos nasce da confluência do Rio Samambaia com um córrego sem nome, que se juntam já na divisa entre GO e MG. Para efeitos de simplificação e clareza, esse córrego sem nome será considerado nesse trabalho como o rio São Marcos, sendo tratado como a nascente do mesmo, nesse trecho a montante da divisa.

Os demais rios da bacia são de dominialidade estadual e responsabilidade dos órgãos gestores de recursos hídricos estaduais:

- Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) em Minas Gerais;
- Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA) em Goiás;
- Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA) no Distrito Federal.

Os dados referentes aos trechos d'água foram obtidos da Base Hidrográfica Ottocodificada da Agência Nacional de Águas em escala 1:1.000.000 (ANA, 2007) que mapeou a hidrografia no Brasil inteiro a partir de ottobacias baseadas no método de classificação de Otto Pfafstetter.

3.2.1.2. Usos da água na bacia

3.2.1.2.1. Agricultura irrigada

A bacia do Rio São Marcos possui 96.874 hectares irrigados, dentre os quais, destaca-se o método do pivô central, com presença expressiva na bacia, que figura como a área com maior concentração de pivôs do Brasil (ANA e EMBRAPA, 2014; ANA, 2017a)

É importante separar o que é a prática da agricultura e o que é o sistema empregado para aplicar água na cultura (método de irrigação). Não são raros relatos na literatura onde esses elementos se confundem, e ao sistema de irrigação é atribuída a responsabilidade pelo consumo de água. Por exemplo, em Martins et al. (2015), é mencionado (p.2):

“Observa-se que os pivôs ocupam, principalmente, as proximidades das rodovias, além de gerarem enorme consumo de água e, conseqüentemente, um aumento na pressão sobre os recursos hídricos.”

O consumo de água nesses casos é gerado pela decisão de plantar uma determinada área, com uma determinada cultura. A escolha do método de irrigação para atender a essa demanda, segundo Frizzone (2017), irá depender de características como o solo (capacidade de armazenamento de água, velocidade de infiltração, drenagem, topografia, presença de lençol freático, salinidade, etc.), clima (ventos, umidade relativa do ar, temperatura, precipitação), a água (disponibilidade e qualidade), o tipo de cultura (grão, fruticultura, etc.), dos fatores humanos (formação tecnológica, hábitos, preferências, etc.) bem como os aspectos econômicos e custos.

Nesse sentido, elencar o pivô central, ou qualquer outro método de irrigação que seja, como gerador de consumo de água retira o foco de uma questão importante na gestão dos recursos hídricos, que é o elemento gerador de demanda (nesse caso a área plantada e o tipo da cultura).

Para este trabalho, o mapeamento de pivôs centrais foi realizado a partir de um estudo realizado em parceria pela EMBRAPA e pela ANA que mapeou os pivôs centrais no Brasil (ANA; EMBRAPA, 2014).

Foram mapeados 1.132⁷ pivôs centrais, totalizando uma área irrigada de 96.874 hectares (Quadro disponível no Anexo 3.I). Esses dados foram cruzados com as áreas dos municípios contidas dentro da bacia e se obteve os dados de área irrigada e número de pivôs centrais por municípios e por estado. Os dados de agricultura irrigada por pivô central do estudo mencionado não possuem informações a respeito do tipo de cultivo irrigado em cada pivô. Para obter essa informação é necessário cruzar as informações de área irrigada obtidas via SIG com o banco de dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA (IBGE, 2014) referente às áreas plantada por tipo de cultura e por município. A partir desses dados, para este trabalho, foram selecionadas aquelas culturas que são tipicamente irrigadas por pivô central, que possuem maior representatividade nos municípios da bacia.

Em relação especificamente à bacia do São Marcos, feijão, milho e soja foram historicamente culturas predominantes, com o início de plantio de hortifrutigranjeiros, como batata e alho iniciando a partir da década de 90. Dados da Gerência de Estatística Socioeconômica da SEPLAN⁸ (2009 *apud* QUIRINO; DE SALES; DA SILVA, 2011) também indicam as principais culturas irrigadas por pivô central no município de Cristalina: alho, café, feijão, milho, soja, tomate e trigo. Dentre os cerca de 96.000 hectares irrigados na bacia, destacam-se os municípios de Cristalina e Unaí como os principais irrigantes, assumindo em 2009 as colocações de 11^o e 7^o maiores PIBs agropecuários do Brasil (ANA, 2014).

A partir de informações do SIDRA e do caráter histórico das culturas da região, optou-se por selecionar as culturas de soja, milho, alho, feijão, café e batata como as mais representativas da região, para a modelagem do sistema.

Para a quantificação das demandas hídricas geradas pela agricultura irrigada é necessário distribuir as culturas selecionadas nos 96.874 hectares de área irrigável por pivô central na bacia. Sabendo que as culturas são temporárias (à exceção do café), essa alocação deve ser feita no espaço (96.874 ha disponíveis) e no tempo (12 meses do ano), conforme os ciclos de cultivo de (soja: 4 meses; milho: 6 meses; alho: 6 meses; feijão: 4 meses; batata: 4 meses; café: 12 meses/perene) e os calendários de cultivo (soja: outubro; milho: outubro; milho safrinha: fevereiro; alho: março; feijão - 1^a safra: outubro; feijão - 2^a safra: fevereiro; feijão - 3^a safra: junho; batata: abril; café: perene) de cada cultura (CONAB, 2017; Embrapa e Centro de produção e técnicas - CPT *apud* SEMENTES AG MINAS, 2017).

O plantio de culturas pelo método de pivôs centrais possui peculiaridades que o diferenciam de outros métodos tradicionais de irrigação. Devido aos custos elevados de aquisição, implantação (R\$ 6 mil a R\$ 10 mil por hectare) e manutenção do sistema, existe uma área mínima necessária para tornar seu uso rentável (SUCCESSFUL FARMING, 2018). Além disso, a área irrigada deve ser aproveitada ao máximo, durante o maior período possível. Em MMA, (2011, p. 165), é descrita uma metodologia de estimativa para a distribuição de culturas irrigadas em uma determinada área,

⁷ Para aqueles pivôs cujo polígono coincidia com o divisor de águas da bacia, considerou-se como critério para inclusão todos os polígonos de pivôs centrais que interseccionam o polígono de delimitação da bacia.

⁸ Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento do Estado de Goiás

considerando os ciclos específicos e o calendário agrícola das culturas, e a área disponível, formando um “mosaico”, de distribuição espaço-temporal do plantio das culturas. Este mosaico dá informações de área plantada de cada cultura em cada mês, visto que a distribuição é dinâmica, necessária para acomodar as diferentes culturas, com diferentes ciclos e calendários, na área disponível, de forma a maximizar o uso dessa área e benefícios econômicos advindos do plantio.

Para estimar a demanda de irrigação para agricultura, é necessário estimar como se dá a distribuição desse mosaico na realidade, considerando a ressalva de que ele não segue uma padronização anual, e sim varia ao longo dos anos e das safras, afetado por características exógenas, como demanda e preços de mercado (interno e externo) das culturas, disponibilidade de crédito agrícola, condições climáticas, etc.

Foi elaborada uma rotina de otimização (as funções de otimização estão disponíveis no Anexo 3.II), visando preencher a área disponível durante o máximo de tempo possível do ano, considerando a unidade temporal como o mês, e a unidade espacial como 5% da área disponível, gerando 240 unidades de área*mês. A função objetivo maximiza a área ocupada, sujeito a restrições que representam as características das informações retiradas do SIDRA e do caráter histórico das culturas da região, descritas nos parágrafos anteriores. A rotina foi executada no *solver* do software Microsoft Excel, considerando o pressuposto de que os irrigantes sempre tentarão maximizar sua área plantada, de forma a não ficar com pivôs ociosos, dado seu alto custo de implantação e manutenção. As restrições utilizadas exigem um mínimo de 40% plantada com soja, 25% com milho, 10% com milho safrinha, 10% com feijão, e 5% com as demais culturas (alho, café e batata)⁹. A distribuição resultante está apresentada na Figura 3.3 e no Quadro 3.1.

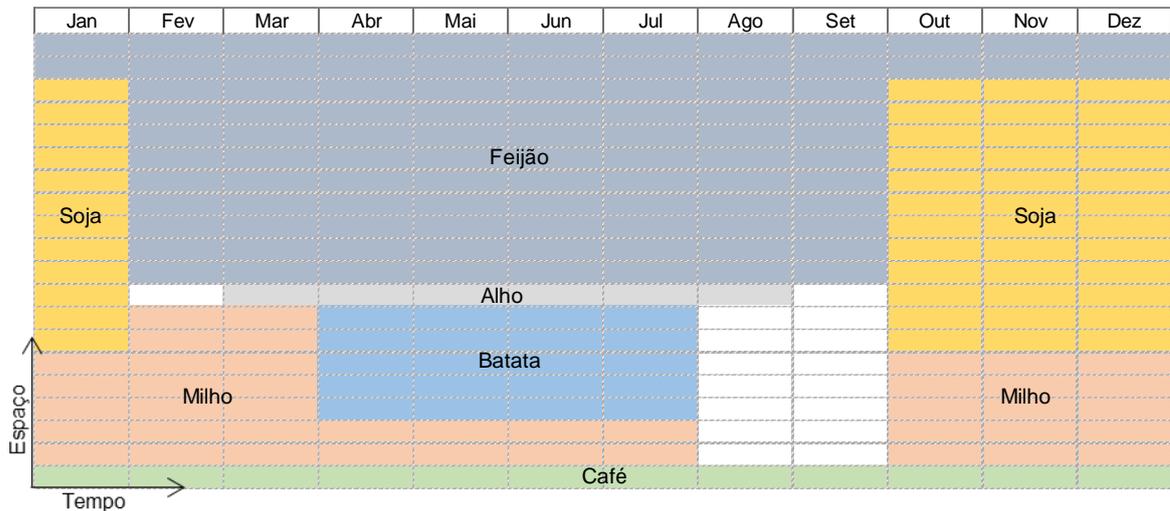


Figura 3.3 - Distribuição espaço-temporal do plantio de culturas irrigadas para a simulação na bacia hidrográfica do Rio São Marcos

⁹ As funções de restrição se aplicam aos meses do calendário agrícola das determinadas culturas. Por exemplo: soja só é plantada de outubro a janeiro, logo, nesses meses, existe uma restrição de ao menos 40% da área, restrição que não se aplica aos restantes dos meses do ano. Milho é plantado de outubro a março, milho safrinha de fevereiro a julho, café é uma cultura perene, etc.

Quadro 3.1 - Distribuição espaço-temporal do plantio de culturas irrigadas para a simulação na bacia hidrográfica do Rio São Marcos

Cultura	Área irrigada (ha/mês)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Soja	60%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	60%	60%	60%
Milho	25%	35%	35%	10%	10%	10%	10%	0%	0%	25%	25%	25%
Alho	0%	0%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	0%	0%	0%	0%
Feijão	10%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	55%	10%	10%	10%
Café	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Batata	0%	0%	0%	25%	25%	25%	25%	0%	0%	0%	0%	0%
Total	100%	95%	100%	100%	100%	100%	100%	65%	60%	100%	100%	100%

Essa utilização do espaço partiu do princípio de que os irrigantes vão minimizar a área ociosa, e seguir fatores econômicos e culturais da região, mantendo os cultivos de maior relevância, seguindo os padrões que já existem. A distribuição segue a distribuição de culturas irrigadas obtida nos dados do SIDRA (IBGE, 2014), ainda que com as devidas simplificações: foram utilizadas apenas seis culturas, e foi considerada uma distribuição anual representativa, enquanto na realidade existe variação intra e interanual, impulsionada pelos fatores exógenos já mencionados.

A partir das áreas irrigadas, utilizou-se a Equação (3.1) para o cálculo das demandas de irrigação mensal (MMA, 2011).

$$Q_{c,i} = \sum_{m=1}^{12} A_{i,c,m} \left[\frac{ETo_{c,m} \cdot Kc_{c,m} \cdot Ks_{c,m} - Pef_m}{Ea} \right] \cdot 10 \quad (3.1)$$

Onde,

$Q_{m,i}$ é a vazão demandada para irrigação (i) da cultura (c) [m³/mês];

$A_{i,c,m}$ é a área irrigada da cultura (c) no mês [ha];

$ETo_{c,m}$ é a evapotranspiração de referência no mês (m), calculada pela equação de Penman-Monteith [mm/mês];

$Kc_{c,m}$ é o coeficiente de cultura (c) no mês (m) [-];

$Ks_{c,m}$ é o coeficiente de umidade da cultura (c) no mês (m) [-];

Pef_m é a precipitação efetiva no mês (m) [mm/mês];

Ea é a eficiência de aplicação da irrigação [-].

O objetivo foi de obter as demandas de evapotranspiração da planta, isto é, a água que a planta efetivamente precisa, e não a demanda hídrica a ser captada. Para isso, nos cálculos, utilizou-se uma eficiência de irrigação (Ea) de 1, simulando uma eficiência de 100%¹⁰.

Os valores de k_c para as culturas foram retirados do estudo “Matriz de Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos para a Agricultura Irrigada” contido no relatório “Desenvolvimento de Matriz de Coeficientes Técnicos para Recursos Hídricos no Brasil” (MMA, 2011), e para k_s foi utilizado o valor de 1.

¹⁰ Isso foi feito porque o modelo PDDE já considera a eficiência de aplicação a partir dos dados de entrada de demanda. Caso se considerasse uma eficiência de aplicação aqui, ela seria calculada duas vezes.

Os valores de precipitação efetiva mensal e evapotranspiração de referência estão apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Valores de precipitação efetiva média mensal e evapotranspiração de referência média mensal de referência utilizados

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Pef (mm)	113,82	102,69	110,00	57,55	17,00	4,76	3,83	9,78	29,24	69,62	109,49	123,00
ETo (mm)	109,66	101,75	93,34	91,81	81,09	74,46	89,26	104,05	100,73	103,79	102,77	94,36

Fonte: FAO (2006)

As demandas resultantes estão apresentadas no Quadro 3.3 e na Figura 3.4, para cada cultura, a cada mês.

Quadro 3.3 - Demandas de evapotranspiração mensal real na bacia hidrográfica do rio São Marcos

Cultura	Demanda de evapotranspiração (hm ³)												Anual
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Soja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,91	5,06	0,00	33,97
Milho	4,30	0,67	0,00	0,00	3,07	3,87	4,82	0,00	0,00	13,30	3,35	0,00	33,38
Alho	0,00	0,00	0,00	1,66	3,10	25,02	30,08	34,80	0,00	0,00	0,00	0,00	94,66
Feijão	0,00	0,00	0,00	20,70	29,83	17,30	47,90	53,00	32,72	0,00	0,00	0,00	201,45
Café	0,00	0,00	0,00	1,44	2,91	3,20	3,92	4,31	3,22	1,15	0,00	0,00	20,15
Batata	0,00	0,00	0,00	11,63	18,47	12,37	15,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,76
Total	4,30	0,67	0,00	35,43	57,38	61,75	102,00	92,12	35,94	43,37	8,41	0,00	441,36

A evapotranspiração total calculada para agricultura foi de 441,36 hm³. Para uma eficiência de aplicação de irrigação de 0,8, obtém-se uma demanda hídrica de 551,7 hm³, ao que equivale a uma vazão média de 17,49 m³/s. Nos 96.874 ha irrigados na bacia, isso equivale a uma demanda unitária média de 0,18 L/s.ha, coerente com os valores unitários descritos em MMA (2011).

A distribuição anual das demandas com as respectivas precipitações efetivas mensais, está apresentada na Figura 3.4.

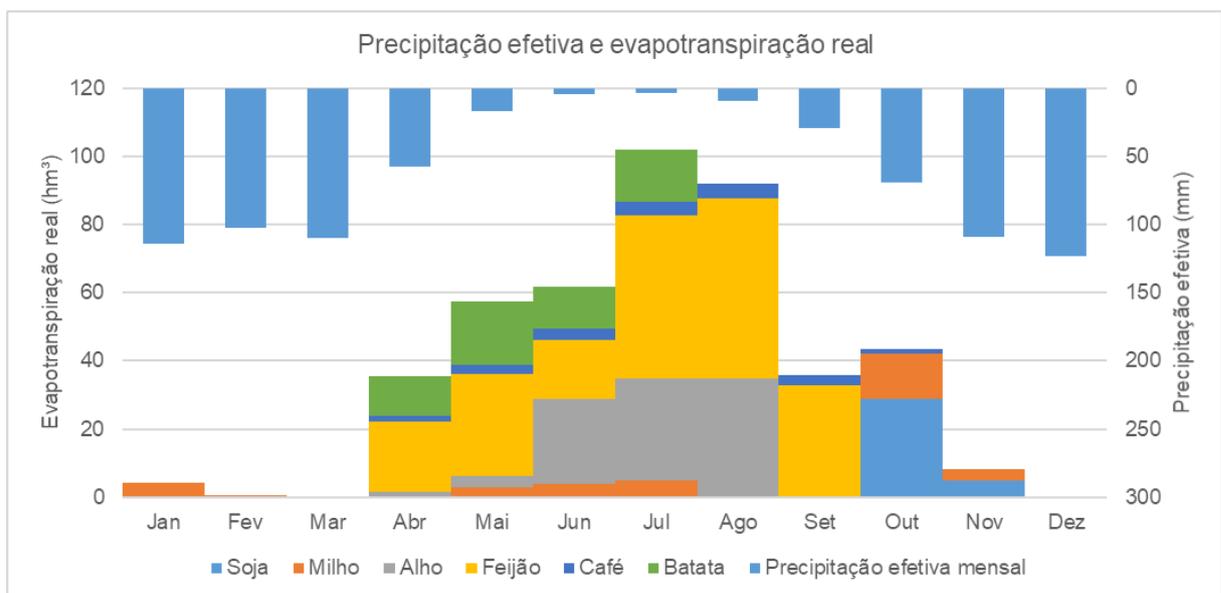


Figura 3.4 - Demandas resultantes de evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio São Marcos

A maior parte da agricultura irrigada se concentra na cabeceira da bacia, justamente onde a água é mais escassa devido às menores áreas de drenagem. Conforme se desloca para jusante ao longo do Rio São Marcos, a quantidade de pivôs diminui, até as proximidades da UHE Serra do Facão, onde é possível observar a reduzida presença de agricultura irrigada.

3.2.1.2.2. Geração de energia hidrelétrica

A base de dados para o mapeamento dos reservatórios e usinas hidrelétricas (UHEs) da bacia foi obtida do Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL) (ANEEL, [s.d.]). A ANEEL disponibiliza um banco de dados dos aproveitamentos hidrelétricos em operação e inventariados em todo o território brasileiros.

A base de dados da ANEEL apresenta quatro UHEs na área da bacia, das quais duas estão inventariadas (Mundo Novo e Paraíso) e duas em operação (Batalha e Serra do Facão). Serão consideradas para este estudo, as duas que se encontram operacionais.

A partir de dados do Sistema de Informações do Potencial Elétrico Brasileiro (SIPOT, 1999) e Geraldo, et al. (2018) foram obtidas características técnicas e operacionais dos dois reservatórios em operação no rio São Marcos, a UHE Batalha e UHE Serra do Facão.

3.2.1.2.3. Vazões afluentes aos reservatórios

As vazões afluentes aos dois reservatórios em operação da bacia, UHE Batalha e UHE Serra do Facão, foram obtidas a partir das séries de vazões afluentes naturalizadas disponibilizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2016). Para obtenção das séries de vazões afluentes em locais onde não há disponibilidade dos dados do ONS, foi feito um cálculo de regionalização das séries de vazões a partir das respectivas áreas de contribuição, através da relação descrita na Equação (3.2).

$$q_{esp} \left[\frac{m^3}{s \cdot km^2} \right] = \frac{Q \left[\frac{m^3}{s} \right]}{A [km^2]} \quad (3.2)$$

Existem outros fatores relevantes em um estudo de regionalização, como a inclusão de um maior número de pontos de controle, utilização de séries de vazões diárias, análise estatística, inclusão de dados de precipitação, além de dados de área. Entretanto um estudo mais detalhado nesse sentido encontra-se fora do escopo do presente trabalho.

3.2.1.2.4. Visão geral

Na Figura 3.5 está representado um mapa da área de estudo com as informações relevantes apresentadas. Os pivôs centrais de irrigação, as UHEs e seus reservatórios, e a hidrografia da bacia.

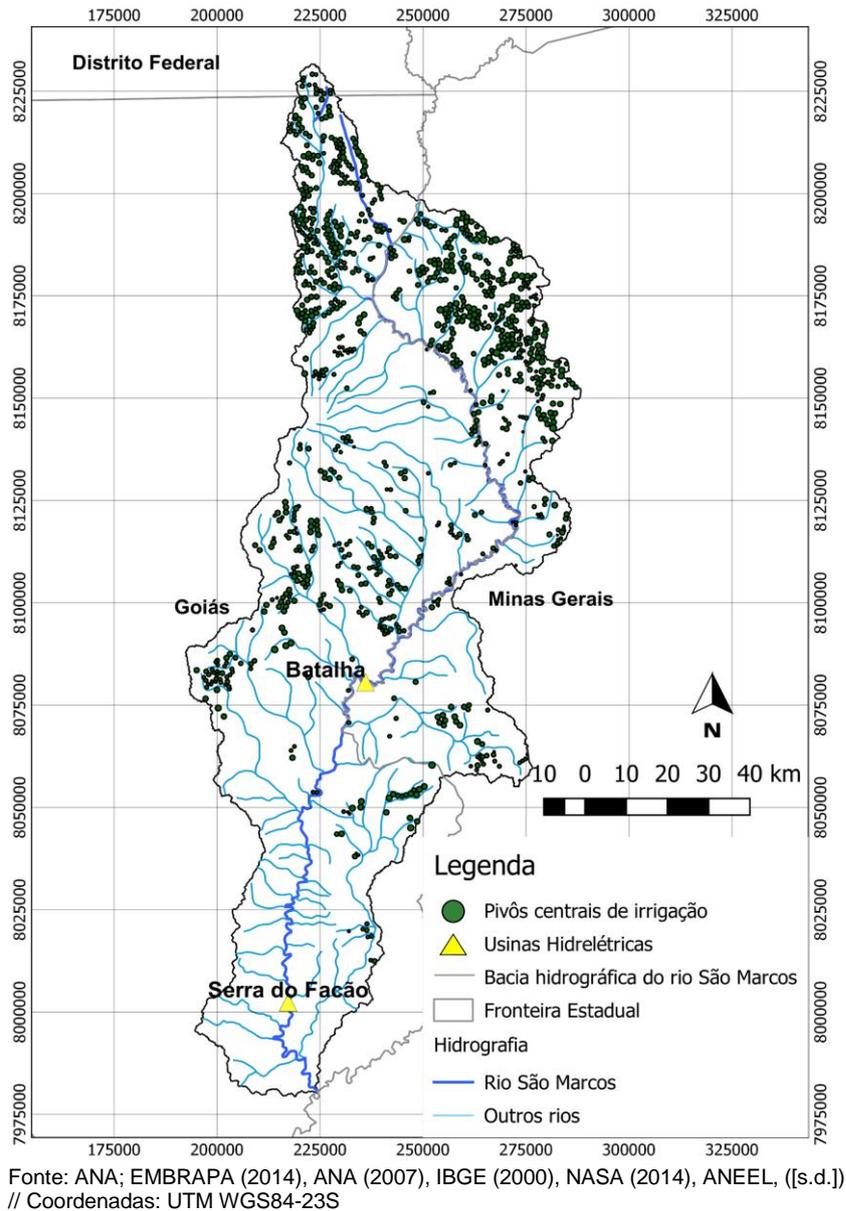


Figura 3.5 - Mapa da bacia do São Marcos com os dados de interesse

Destacado em azul mais escuro está o rio principal da bacia, o rio São Marcos, onde se localizam os dois reservatórios para geração de energia hidrelétrica: Batalha e Serra do Facão. Concentrados principalmente na cabeceira da bacia estão os pivôs centrais, que se tornam mais escassos conforme se movimenta para jusante no rio.

3.2.2. Usos de recursos hídricos outorgados na bacia

Com o objetivo de realizar uma caracterização mais fidedigna dos usos da água existentes na bacia do São Marcos foram analisadas as outorgas em vigor na bacia de 2015 em diante, nos estados de Minas Gerais e Goiás, e as outorgas federais, emitidas pela ANA.

Foram buscadas informações de outorga nos portais dos órgãos gestores do Estado de Goiás e Minas Gerais e da ANA, os dados foram então compilados e estão apresentados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Outorgas na bacia do rio São Marcos

Tipo de uso	Domínio	Responsável	Nº de outorgas	Vazão outorgada	
				m³/s	hm³/ano
Abastecimento Público	Estadual	GO	1	0,023	0,73
Abastecimento Público	Federal	ANA	1	0,003	0,09
Aproveitamento Hidroelétrico	Federal	ANA	1	0	0
Aquicultura em Tanque Rede	Federal	ANA	1	0	0
Bombeamento	Estadual	GO	4	0	11
Indústria	Federal	ANA	1	1,111	35,04
Mineração	Estadual	GO	3	0,125	3,95
Mineração-Outros Processos Extrativos	Federal	ANA	2	0,695	21,90
Outras	Federal	ANA	1	0,002	0,06
Paisagismo	Estadual	MG	4	0	0
Reservatório/Barramento/Regularização de Vazões	Federal	ANA	9	0	0
Bombeamento para irrigação	Estadual	GO	6	0,876	27,63
Canalização para irrigação	Estadual	GO	4	0,546	17,22
Irrigação	Federal	ANA	52	2,191	69,10
Irrigação	Estadual	GO	70	4,921	155,19
Irrigação	Estadual	MG	19	2,011	63,41
Total para irrigação	-	-	151	10,545	287,70
Total para outros	-	-	28	2,300	72,54

Observa-se que os usos d'água para irrigação superam em muito os outros usos da bacia, tanto em número de outorgas quanto em vazão outorgada, com uma demanda outorgada de 10,54 m³/s. Além da irrigação há apenas uma outorga de maior expressividade, de uso industrial, que capta água diretamente no rio São Marcos, a jusante da UHE Serra do Facão, com vazão outorgada de 1,1 m³/s.

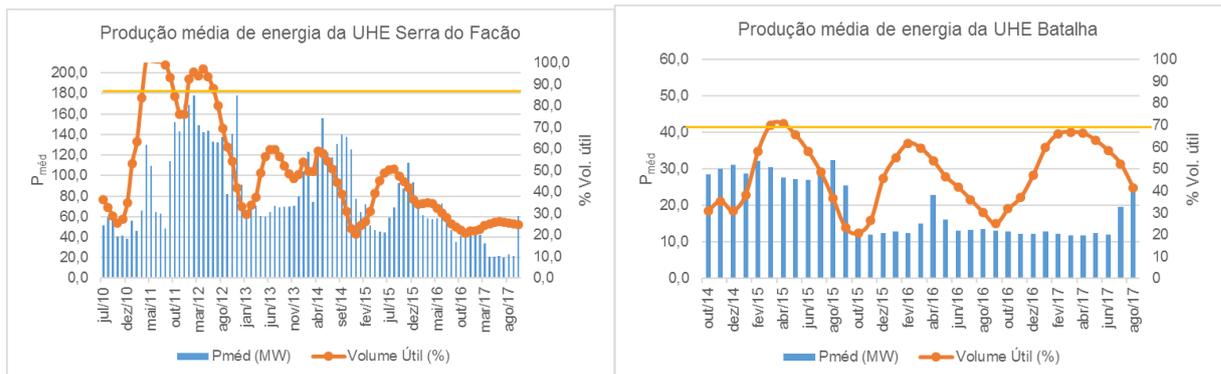
Na Nota Técnica nº 104 /2010/GEREG/SOF-ANA, a ANA levanta a questão dos pivôs centrais irregulares na área, sem seus usos devidamente outorgados. Considerando que a vazão estimada a partir da metodologia do MMA foi de 17,49 m³/s, e 10,545 m³/s estão outorgados, há uma demanda de 6,954 m³/s não outorgados, representando 43% da demanda agrícola.

3.2.3. Usos competitivos pela água na bacia do Rio São Marcos

A bacia do rio São Marcos possui como principal característica de relevância para esse estudo o uso competitivo entre agricultura e geração de energia elétrica, resultando em um forte nexo de interdependência e correlação entre água, energia hidrelétrica e produção de alimento. Para uma dada disponibilidade hídrica aliada a uma probabilidade de ocorrência de vazões, existem decisões a serem tomadas acerca de onde alocar a água disponível em cada intervalo de tempo. No caso do sistema hídrico São Marcos, a água é considerada um recurso que serve como insumo para a geração de energia elétrica e produção agrícola, dotado de valor econômico e escasso, onde sua utilização em um determinado uso gera um custo de oportunidade em um uso alternativo na qual o recurso poderia estar sendo aplicado.

Ao considerar a água um recurso dotado de valor econômico, as decisões alocativas se deparam com um *trade-off* - isto é, uma relação de custo-benefício onde uma escolha feita, minimiza ou soluciona um problema, e agrava ou cria outro - onde a utilização do recurso por um usuário pode resultar na diminuição da disponibilidade para outro, se ocorrer rivalidade entre os usos.

Segundo dados da ANA (2010b), a escassez está afetando as usinas hidrelétricas de Batalha e Serra do Facão, que não estão conseguindo gerar a energia firme prevista em contrato, devido ao uso de água pela agricultura irrigada existente a montante das usinas. Na Figura 3.6 estão apresentadas as estimativas de potência gerada média mensal das UHEs da bacia do São Marcos, adaptadas do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017). A linha amarela representa a potência média necessária para geração da energia firme.



Fonte: Adaptado de ANA (2017)

Figura 3.6 - Estimativas de potência média mensal gerada nas usinas

Os gráficos indicam falhas recorrentes na geração da energia firme para o período considerado. Cabe destacar que o período coincide com um período de estiagem no Brasil, que teve início em 2012 e que até a presente data (2018) ainda não se normalizou. Esse aspecto, contudo, torna a água mais escassa e agrava o cenário de geração. Além disso, a usina de Batalha entrou em operação em 2014, e ainda não está operando com 100% de sua capacidade.

Não é possível afirmar, considerando apenas essas informações, que a causa das falhas na geração de energia são decorrentes do uso da água na agricultura irrigada; o motivo pode ser a baixa disponibilidade hídrica, entre os anos de 2013 a 2017. No entanto, as demandas agrícolas vêm crescendo substancialmente na bacia do São Marcos com a expansão da agricultura irrigada, e os limites de consumo de água definidos pelos marcos legais têm acompanhado esse crescimento, como pode ser observado na Figura 3.7.

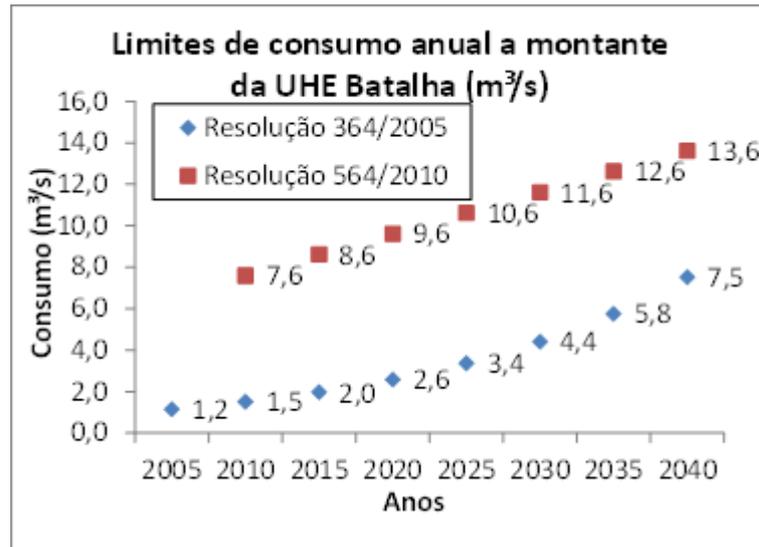


Figura 3.7 - Comparação dos limites de consumo a montante da UHE Batalha

Além disso, conforme discutido anteriormente, há indícios de que a demanda real de água é ainda maior do que a outorgada, ou seja, ultrapassa o limite do marco legal, conforme mencionado na NT da ANA (ANA, 2010b), e estimado no item 3.2.1.2.1. Agricultura irrigada.

Este contexto de conflito, usos irregulares, marcos legais e ausência de critérios para definição de prioridades no uso da água, aumenta a complexidade da situação da bacia.

3.2.4. Formulação do modelo hidroeconômico

O modelo hidroeconômico emprega um algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica - PDDE. A abordagem de Programação Dinâmica Dual Estocástica está descrita em Pereira (1989), sendo que a implementação específica da PDDE utilizada neste trabalho, para um sistema hídrico com reservatórios e usos agrícolas e hidroenergéticos está descrita em maior detalhe em Goor et al. (2010), sendo utilizado também em Tilmant, Arjoon e Marques (2014). O algoritmo roda no software Matlab e o *solver* utilizado para solucionar o problema de otimização é o *Gurobi Optimization*.

O propósito do modelo hidroeconômico é calcular o valor econômico da água e sua variação no espaço e no tempo dentro da área de estudo, permitindo a avaliação dos *trade-offs*. Ele parte de uma representação dos elementos de interesse na área, que identificam tanto as demandas hídricas, sua sazonalidade e os benefícios econômicos associados, como os demais elementos do sistema hídricos responsáveis pela distribuição e armazenamento da água (reservatórios artificiais, canais e rios). Para efeitos de aplicação do modelo, a bacia hidrográfica do São Marcos será chamada de sistema São Marcos, quando estiver sendo representado no modelo hidroeconômico.

Os dados de interesse para a representação do sistema no modelo hidroeconômico são: área irrigada, demanda hídrica para a irrigação, reservatórios, unidades geradoras de energia hidrelétrica, interconexões dos elementos da bacia (topologia) e entradas e saídas de água da bacia (hidrologia). As demandas urbanas e industriais foram desconsideradas no modelo, dadas as suas pequenas vazões outorgadas em relação aos usos da agricultura irrigada. Ao contrário do que ocorre na agricultura, para as demandas industriais e para abastecimento é muito difícil fazer um uso irregular,

sem outorga, devido à maior facilidade de fiscalização destes empreendimentos, ao contrário da agricultura, onde os usos são mais difusos e distribuídos em menores empreendimentos.

O modelo hidroeconômico resolve um problema de otimização da alocação da água, cuja função objetivo busca maximizar o retorno econômico do uso de água para a agricultura irrigada e para a geração hidrelétrica. Entretanto, o objetivo do modelo nesse trabalho não é encontrar uma “solução ótima” para a alocação da água na bacia, mas sim calcular o limite superior (*upper bound*) em benefícios econômicos possíveis, considerando o sistema operado de forma eficiente (eficiente aqui refere-se à forma que produz os maiores retornos possíveis comparando-se produção de energia e agricultura irrigada), e empregar esses resultados para avaliar potenciais *trade-offs* entre ambos os setores. Na operação real do sistema, a identificação da alocação “ótima” da água irá requerer um processo de negociação entre os usuários e a consideração de outros aspectos como a alocação atual, equidade e demandas ecossistêmicas, que estão fora do escopo desse trabalho. O cálculo dos *trade-offs* e do valor econômico da água pode ser útil como ponto de partida para o processo de negociação, como será discutido no próximo artigo.

As variáveis de decisão incluem vazões liberadas dos reservatórios, vazões turbinadas para a geração hidrelétrica e vazões alocadas para a agricultura irrigada, enquanto os volumes armazenados são variáveis de estado. O modelo é sujeito a restrições de ordem física (Ex: capacidade de armazenamento, capacidade das turbinas, dentre outras) e restrição de balanço de massa. No modelo hidroeconômico o sistema é discretizado em elementos (um conjunto de arcos e nós) que armazenam a topologia da área de estudo e as características de cada elemento. Os elementos representados incluem as vazões naturalizadas, as demandas hídricas e os respectivos benefícios econômicos associados, a infraestrutura de armazenamento, a evaporação e as perdas nos sistemas de irrigação. A bacia é discretizada em doze nós, considerados porções representativas.

Para a configuração dos arcos e nós, foram consideradas quatro características relevantes: reservatórios, áreas de drenagem com e sem retirada de água para agricultura irrigada e topologia, necessários para garantir os fluxos de água adequados para a configuração do sistema e representação adequada da realidade:

- A cabeceira da bacia, por possuir alta concentração de irrigação, será dividida entre 3 nós irrigados (1 - “Rio Samambaia”, 2 - “São Marcos Cabeceira”, e 12 - “Irrigação Minas Gerais”)¹¹;
- Cada reservatório é representado por um nó (nós 6 - “Batalha” e 8 - “Serra do Facão”);
- A porção que contribui diretamente para os reservatórios será dividida entre áreas com e sem retirada de água (nós 5 - “Contribuição Batalha” e 10 - “Consumo Batalha”, e nós 7 - “Contribuição Serra do Facão” e 11 - “Consumo Serra do Facão”);

¹¹ Os nomes dos nós 1 e 2 vêm dos principais corpos hídricos das suas áreas, e o nó 3 vem do fato de ser a maior concentração de irrigação na bacia no território de Minas Gerais.

- A confluência entre os três nós de montante será representada por um nó (3 - “Confluência”), e a ligação entre esse nó e o nó contribuinte à UHE Batalha será outro (4 - “Mundo Novo”)¹²;
- O último nó é da área a jusante da UHE Serra do Facão, que ainda possui agricultura irrigada, e conseqüentemente retirada de água, e representa o nó final do sistema (nó 9 - “Exutório”).

No Quadro 3.5 estão apresentados os nós do sistema com seus elementos de interesse.

Quadro 3.5 - Descrição dos nós do sistema

Nós do sistema	Nome	Elementos no sistema			Área irrigada (ha)
		Agricultura irrigada	Reservatórios e geração de Energia	Configuração topológica do sistema	
1	Rio Samambaia	X			17.560,32
2	São Marcos Cabeceira	X			7.580,68
3	Confluência			X	0
4	Mundo Novo			X	0
5	Contribuição Batalha			X	0
6	Batalha		X		0
7	Contribuição Serra do Facão			X	0
8	Serra do Facão		X		0
9	Exutório	X			2.622,06
10	Consumo Batalha	X			20.151,77
11	Consumo Serra do Facão	X			23.749,33
12	Irrigação Minas Gerais	X			25.209,64
Total					96.873,79

Na Figura 3.8 está apresentada a representação topológica do modelo de arcos e nós. O nó R6 representa o reservatório e UHE de Batalha e nó R8 representa o reservatório e UHE Serra do Facão

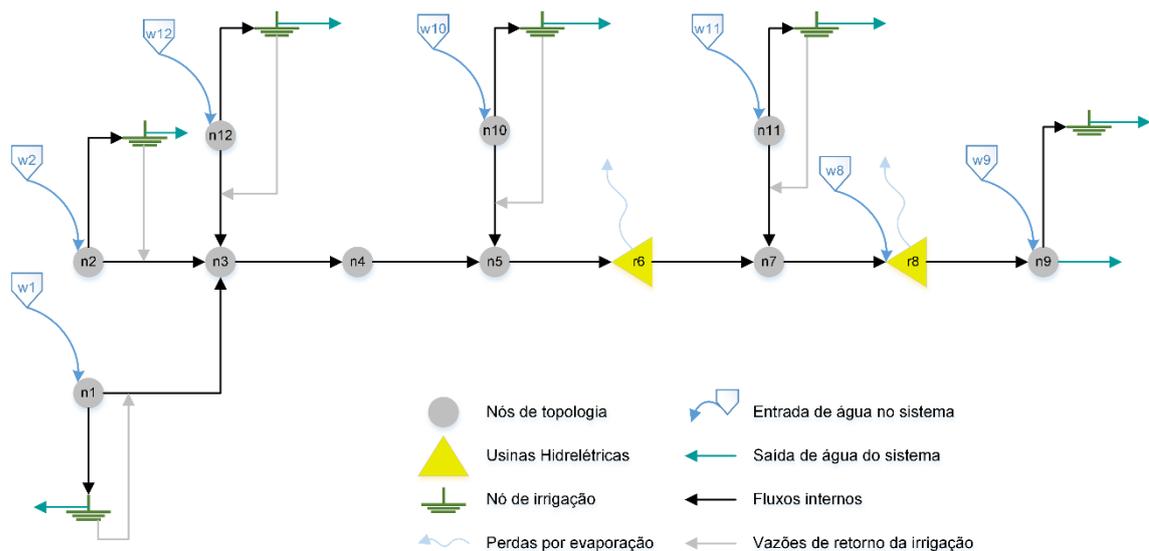


Figura 3.8 - Discretização da bacia em uma rede de arcos e nós

¹² O nó 4 recebe seu nome por ser coincidente com o local onde a UHE Mundo Novo está inventariada. A escolha desse ponto também é estratégica visando possíveis trabalhos futuros que venham a analisar o impacto da UHE Mundo Novo no sistema, para que não seja necessário refazer a configuração da topologia do sistema.

Por fim, na Figura 3.9 está apresentada a discretização do sistema espacializada no sistema São Marcos, sobre o mapa da bacia.

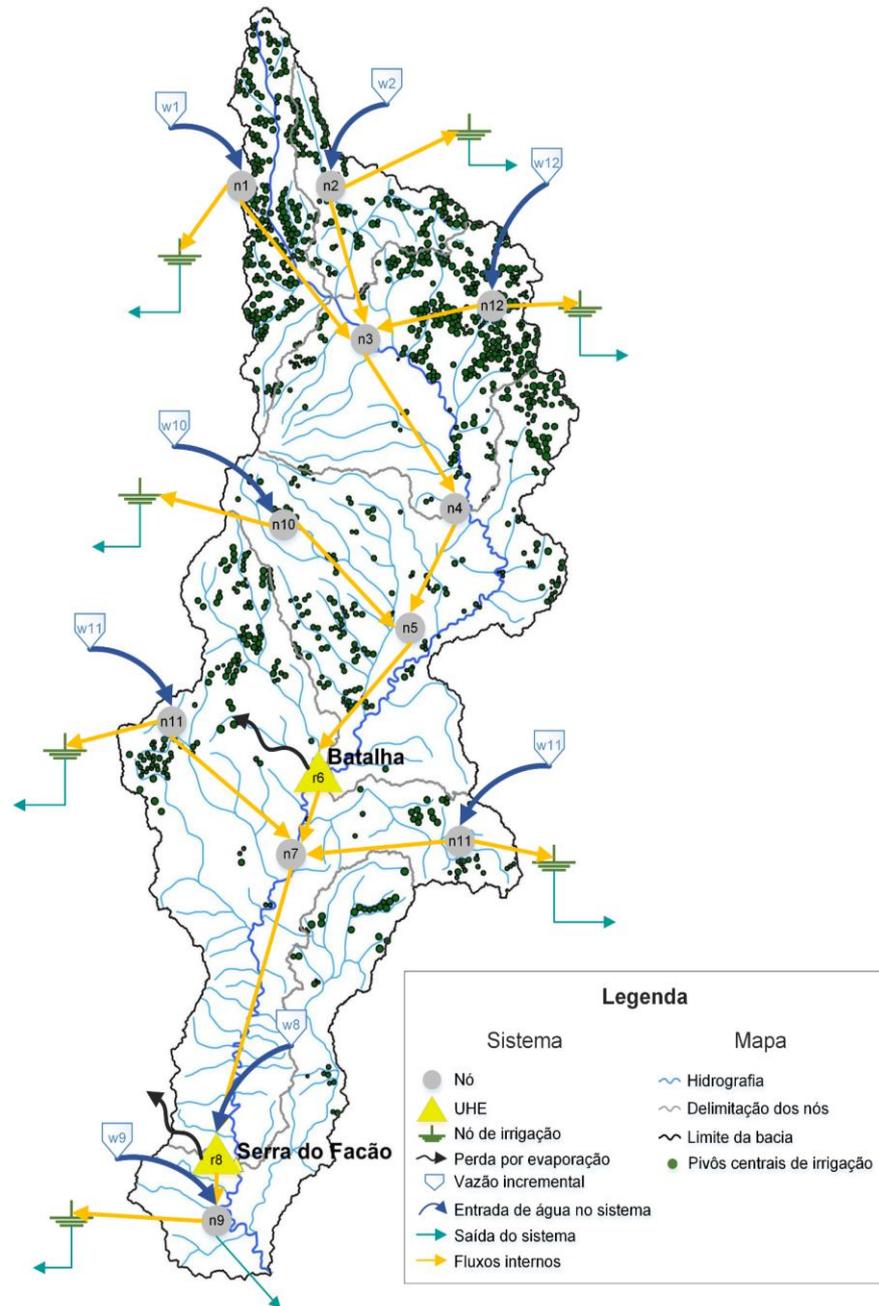


Figura 3.9 - Evapotranspirações reais espacializadas no sistema São Marcos

Para avaliar os *trade-offs* entre usos de água para geração de energia e agricultura irrigada, e calcular os custos de oportunidade da água, o modelo hidroeconômico aplicado ao sistema São Marcos compara dois arranjos distintos. Um desses arranjos busca maximizar benefícios econômicos combinados (agricultura + energia), denominado “**arranjo econômico**”. O outro considera apenas a geração de energia, buscando maximizar os benefícios econômicos do sistema somente através da energia hidrelétrica, denominado “**arranjo energético**”.

A execução do modelo gera séries sintéticas de vazões a partir das séries observadas, aloca as vazões disponíveis para os usos que gerarão o maior valor, respeitando as restrições de balanço de massa do sistema, extrai os valores marginais da água variando no tempo e no espaço e os benefícios totais gerados no sistema, resultado da função objetivo a ser maximizada.

A execução do modelo relacionado à geração de energia hidrelétrica realiza a operação dos reservatórios visando a maximização de benefícios econômicos. Ou seja, toma decisões a respeito da vazão turbinada e vertida a cada mês, e conseqüentemente do armazenamento.

A execução do modelo relacionada à agricultura irrigada aloca as vazões disponíveis para os blocos de irrigação, onde cada bloco representa uma cultura em um nó. Os blocos totalizam 36 blocos (6 culturas em 6 nós de agricultura).

No arranjo econômico, o modelo hidroeconômico aloca a água visando a **maximização do benefício econômico total do sistema** (soma dos benefícios econômicos da produção de energia elétrica e da produção agrícola). A água é alocada respeitando as restrições de balanço de massa, topologia do sistema e disponibilidade hídrica. Não existem restrições específicas ao comportamento dos usuários, como vazão mínima turbinada nas UHE's ou produção agrícola mínima, apenas restrições de disponibilidade e balanço. A configuração do modelo PDDE neste arranjo é denominada "econômica", pois aloca a água conforme as restrições e a maximização do benefício econômico.

No cenário energético, o modelo hidroeconômico aloca a água unicamente para a geração de energia, visando **maximizar o benefício econômico advindo da geração hidrelétrica**. A configuração do modelo PDDE nesse cenário é denominada "energética", pois a alocação e operação dos reservatórios é otimizada visando a maximização do benefício econômico tendo a geração de energia como único uso.

Através da comparação entre esses dois arranjos, é possível avaliar **(i)** o benefício econômico gerado pela agricultura irrigada no sistema São Marcos; **(ii)** o *trade-off* ao benefício econômico das usinas hidrelétricas em relação ao uso agrícola; e **(iii)** as contribuições dos dois setores à economia do sistema como um todo.

Ressalta-se que o objetivo dessa análise não é avaliar a quem a água deveria estar sendo alocada, nem fornecer respostas objetivas a respeito de como deve ser realizado o rateio da água entre esses usuários, mas sim avaliar os *trade-offs* referentes aos diferentes arranjos. As prioridades de uso da água no Brasil se dão por diversos fatores legais, econômicos, sociais e ambientais, e a resposta não se dá através da observação de apenas um desses fatores.

3.2.5. Resolução do problema de otimização e algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE)

O problema de otimização proposto no modelo hidroeconômico é um problema clássico de operação de reservatórios múltiplos, onde se busca a trajetória operacional ótima de armazenamento e liberação de água. Nesse tipo de problema, busca-se maximizar a soma dos benefícios presentes (decorrentes da liberação da água armazenada para a geração de energia e irrigação) com os

benefícios futuros, que dependem da quantidade de água que permaneceu armazenada no reservatório e das vazões afluentes futuras, que são incertas. Uma vez que a quantidade de água que permaneceu armazenada depende das decisões presentes de uso, temos um acoplamento temporal das decisões. Dessa forma, trata-se de um problema multiestágio, com características de estocasticidade, acoplamento temporal e não linearidade (tanto os benefícios da produção agrícola podem variar de forma não linear com a água utilizada, quanto os próprios benefícios da geração hidrelétrica também variam de forma não linear, na medida em que dependem não apenas da vazão turbinada mas também do nível em que se encontra o reservatório). Um exemplo de formulação do problema geral de otimização multiestágio é dada por (3.3) Tilmant, Arjoon e Marques (2014).

$$Z = \mathbb{E}_{q_t} \left[\sum_{t=1}^T \alpha_t b_t(\mathbf{S}_t, \mathbf{u}_t, \mathbf{q}_t) + \alpha_{T+1} v(\mathbf{S}_{T+q}, \mathbf{q}_T) \right] \quad (3.3)$$

Onde,

\mathbb{E} é o operador de maximização do valor esperado [-];

t é o indexador de tempo [mês];

T é o último período de tempo [mês];

α é um fator de desconto para o valor do benefício econômico no tempo [-];

b_t é a função de benefício econômico em um estágio t [R\$];

\mathbf{S}_t é o armazenamento no início de t [hm³];

\mathbf{u}_t é o vetor de alocação (variáveis de decisão: turbinar, verter) [hm³];

\mathbf{q}_t é o vetor de vazões afluentes [hm³];

v é uma função de valor terminal, que estima o valor de $F_{T+1}(\mathbf{S}_{T+1})$ no período de tempo T [R\$];

Sendo que (3.3) é a função objetivo que maximiza o benefício econômico total e Z é o benefício total esperado em $t = 1, 2, 3, \dots, T$

Sujeito às restrições:

$$\underline{\mathbf{u}}_{t+1} \leq \mathbf{u}_{t+1} \leq \bar{\mathbf{u}}_{t+1} \quad (3.4)$$

$$\underline{\mathbf{S}}_{t+1} \leq \mathbf{S}_{t+1} \leq \bar{\mathbf{S}}_{t+1} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{S}_{t+1} = \mathbf{S}_t - \mathbf{C}\mathbf{u}_t + \mathbf{q}_t - \mathbf{e}_t \quad (3.6)$$

Onde \mathbf{C} é uma matriz de conectividade ligando os diferentes elementos do sistema.

Problemas com essas características podem ser resolvidos com algoritmos de programação dinâmica estocástica (PDE), cuja função objetivo apresenta um componente para os benefícios presentes e um componente recursivo para os benefícios futuros. Ao resolver o problema, o algoritmo de PDE discretiza as variáveis de estado em um *grid* de valores pré-definidos (volumes armazenados s e vazões afluentes q), calcula o valor da função de benefícios futuros para cada ponto do *grid* de variáveis de estado e realiza uma interpolação para encontrar os demais valores entre os pontos do

grid. Entretanto, nesse tipo de abordagem o tamanho do problema cresce exponencialmente com o número de variáveis de estado, impedindo a sua aplicação em problemas com muitas variáveis (problema da dimensionalidade).

Ao resolver o problema definido pelas Equações (3.3) a (3.6) com um algoritmo de programação dinâmica estocástica (PDE), temos a função de benefícios presentes e futuros descrita pela Equação (3.7).

$$F_t(\mathbf{S}_t, \mathbf{q}_{t-1}) = \max_{\mathbf{u}_t} \{ \mathbb{E}_{\mathbf{q}_t | \mathbf{q}_{t-1}} [b_t(\mathbf{S}_t, \mathbf{u}_t, \mathbf{q}_t) + \alpha_{t+1} F_{t+1}(\mathbf{S}_{t+1}, \mathbf{q}_t)] \} \quad (3.7)$$

Tal solução irá produzir um conjunto de tabelas indicando qual a vazão ótima a ser liberada r^* para cada combinação das variáveis de estado $\mathbf{S}_t, \mathbf{q}_{t-1}$. Entretanto, como colocado, a solução desse problema requer a discretização de todo o espaço de estados (valores de S e q), tornando o custo computacional do problema excessivamente grande para um maior número de variáveis de estado.

Para contornar essa limitação, diversas técnicas são propostas na literatura, dentro de um campo chamado Programação Dinâmica Aproximada (PDA) (PEREIRA, 1989; PEREIRA e PINTO, 1991). Dentre essas técnicas, a abordagem de programação dinâmica dual estocástica (PDDE) é capaz de criar uma função de benefícios futuros localmente aproximada, empregando extrapolações sucessivas construídas a partir das variáveis duais do problema de otimização estocástica. Esse algoritmo, apresentado em maior detalhe a seguir, torna desnecessária a discretização de todo o espaço de estados (valores que podem ser atribuídos à variável de estado) e evita o problema da dimensionalidade, podendo ser aplicado a problemas com maior número de variáveis. Diversos dos métodos de otimização empregados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) no Brasil fazem uso de algoritmos de PDDE, razão pela qual foi escolhido para o presente trabalho.

No PDDE a função de benefícios futuros F_{t+1} depende de duas variáveis de estado (armazenamento e vazão afluente) para cada reservatório, resultando em um plano. Uma vez que tanto a vazão quanto o armazenamento também variam no tempo, a aproximação da função de valor futuro depende de três variáveis. Dessa forma, a aproximação de F_{t+1} é feita por uma série de hiperplanos, cujos coeficientes são calculados em um processo iterativo descrito a seguir. A formulação para o problema de PDDE de um único estágio é então dada pela Equação (3.8):

$$F_t(\mathbf{S}_t, \mathbf{q}_{t-1}) = \max_{\mathbf{u}_t} [b_t(\mathbf{S}_t, \mathbf{u}_t, \mathbf{q}_t) + \alpha_{t+1} F_{t+1}] \quad (3.8)$$

Sujeito a um conjunto de restrições que representam uma aproximação da função de benefícios futuros por hiperplanos (3.9):

$$\begin{cases} F_{t+1} - \kappa_{t+1}^1 \mathbf{u}_{t+1} \leq \gamma_{t+1}^1 \mathbf{q}_t + \beta_{t+1}^1 \\ \vdots \\ F_{t+1} - \kappa_{t+1}^L \mathbf{u}_{t+1} \leq \gamma_{t+1}^L \mathbf{q}_t + \beta_{t+1}^L \end{cases} \quad (3.9)$$

Onde,

L é o número de hiperplanos;

κ_{t+1}^l , γ_{t+1}^l e β_{t+1}^l são os parâmetros do l -ésimo hiperplano esperado, calculado a partir das variáveis duais do problema de otimização no estágio $t+1$.

A solução para o algoritmo PDDE é um processo iterativo, que alterna corridas de otimização para frente (*forward pass*) e corridas de otimização para trás (*backwards pass*). Inicialmente, é empregado um modelo periódico autoregressivo (MPAR) para processar as séries de vazões afluentes (dados de entrada) em cada ponto da rede e produzir um conjunto de séries sintéticas. O número de séries geradas é definido pelo usuário e no presente estudo foi utilizado um conjunto de 30 séries, similar ao empregado em Tilmant et al (2014; 2015). Mais importante que o número de séries em si é o espalhamento das mesmas sobre o espaço de estados.

O processo inicia com uma corrida de otimização para frente (*forward pass*) do estágio 1 até o estágio T . Nessa primeira corrida para frente, os parâmetros das equações de restrição (hiperplanos) que representam a função de benefícios futuros da água são iguais a zero (valor futuro igual a zero) tratando-se portanto de uma otimização “míope” da operação do sistema. Essa corrida para a frente consiste em uma simulação onde o sistema é otimizado diversas vezes, sendo uma para cada sequência hidrológica possível de vazões afluentes q_T .

Ao completar a primeira corrida de otimização para frente, é gerada uma trajetória de vetores $\{S_1^1, S_2^1, S_3^1, \dots, S_T^1\}$ que representam alguns dos valores possíveis de armazenamento, bem como uma primeira aproximação dos benefícios totais. Como nessa primeira corrida o valor futuro da água é igual a zero, o benefício total calculado é uma aproximação e seu valor é subestimado em relação ao benefício total real (a solução final do problema de otimização).

Em seguida, o modelo inicia uma corrida para trás (*backward pass*) do estágio T até o estágio 1. No estágio T o armazenamento inicial é S_T^1 e o problema de otimização é resolvido para todos os valores de vazões afluentes q_T . A variável dual da equação de balanço de massa (3.6) em T é gravada e utilizada como parâmetro para criar uma equação de restrição para o problema de otimização em $T-1$. A equação de restrição representa um limite superior (valor superestimado) para a função de benefícios futuros F_{t+1} e o modelo segue com a corrida para trás até atingir o primeiro estágio $t = 1$. Ao completar a primeira corrida para trás, o benefício total calculado (que é uma aproximação superestimada da função de valor futuro descrita pelas equações de restrição) é comparado com o benefício total calculado pela primeira corrida à frente, que também calculou um valor de benefício total aproximado (porém subestimado). Se a diferença entre ambos os benefícios se encontra dentro de um limite de tolerância pré-determinado o modelo encerra o procedimento, caso contrário, o modelo executa uma nova iteração.

Em uma nova iteração, a próxima corrida à frente agora recebe um conjunto extra de equações de restrição (hiperplanos), cujos parâmetros foram calculados na última corrida para trás (são as variáveis duais do problema da otimização *backward*) e que descrevem de forma aproximada o valor futuro da água. Assim, essa corrida para frente agora não é mais completamente míope, já que dispõe de uma função aproximada para valor futuro da água. Ao final da segunda corrida à frente, um novo

valor para o benefício total é calculado, agora um pouco mais preciso que o valor da primeira corrida para frente, embora ainda subestimado.

O modelo passa então para a segunda corrida para trás, iniciando novamente em T. Ao gravar a variável dual da equação de balanço de massa (3.6) em T para utilização como parâmetro para as equações de restrição do problema de otimização em T-1, um segundo conjunto de equações de restrição é criado (o primeiro conjunto foi criado durante a primeira corrida para trás). Ao combinar ambos os conjuntos de equações de restrição temos como resultado uma aproximação mais refinada da função de valor futuro da água. Dessa forma, ao completar a segunda corrida de otimização para trás, o novo valor do benefício total é também um pouco mais preciso. A próxima etapa do processo checa novamente a diferença entre o valor do benefício total calculado na corrida à frente (valor subestimado) com o benefício total calculado pela corrida para trás (valor superestimado) e interrompe o processamento em caso de convergência, quando a diferença for menor que um determinado valor (MARQUES; TILMANT, 2013).

Dessa forma, a cada nova iteração, um novo conjunto de restrições (hiperplanos) é adicionado ao modelo, construindo dessa forma uma representação cada vez mais refinada da função valor futuro da água F_{t+1}

O algoritmo PDDE utiliza ainda uma representação analítica da incerteza hidrológica, que limita o esforço computacional necessário para resolver o problema de otimização ao impedir a discretização da variável de estado hidrológica. Na fase para frente, o conjunto de séries sintéticas de vazões são usadas para simular o sistema e checar a precisão da aproximação das funções de benefício futuro. Uma vez que o problema de otimização é resolvido e o algoritmo PDDE convergiu, os resultados da última simulação para frente podem ser usados para analisar a performance do sistema.

Como resultado do modelo, é gerado um vetor para o multiplicador de Lagrange λ_t associado à equação de restrição do balanço de massa, que representa o valor marginal do recurso água, ou seja, o benefício que seria gerado caso uma unidade adicional do recurso estivesse disponível nos reservatórios e nós de demanda. O resultado final será a alocação ótima de água na bacia e os vetores dos valores

marginais da água λ_t^J para cada período t e em cada local J , em um formato
$$\begin{bmatrix} \lambda_1^1 & \dots & \lambda_1^J \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_T^1 & \dots & \lambda_T^J \end{bmatrix}.$$

Considerando que há diferentes culturas nos nós do sistema, e que estas possuem diferentes custos de produção, preços, e produtividade, o valor marginal não é constante, isto é, em um dado mês, novas unidades de água possuem valor diferente das anteriores, conforme vão sendo alocadas para diferentes culturas, o que gera uma curva de valor marginal semelhante à observada na Figura 3.10.

O modelo pressupõe que as culturas estão distribuídas de forma estática durante o ano, o que configura uma simplificação da realidade do plantio por pivô central, com rotatividade entre as culturas. Para adequar essa realidade ao modelo foi feita uma adaptação do mapeamento por distribuição espaço-temporal realizado para definir as demandas da agricultura, somando todas as áreas*mês de cada cultura e dividindo pelo número total de áreas*mês, chegando a percentuais de distribuição das

culturas no espaço e no tempo. Esses percentuais foram considerados como as distribuições espaciais estáticas para entrada no modelo. Uma descrição mais detalhada dessa metodologia está apresentada no Anexo 3.I.

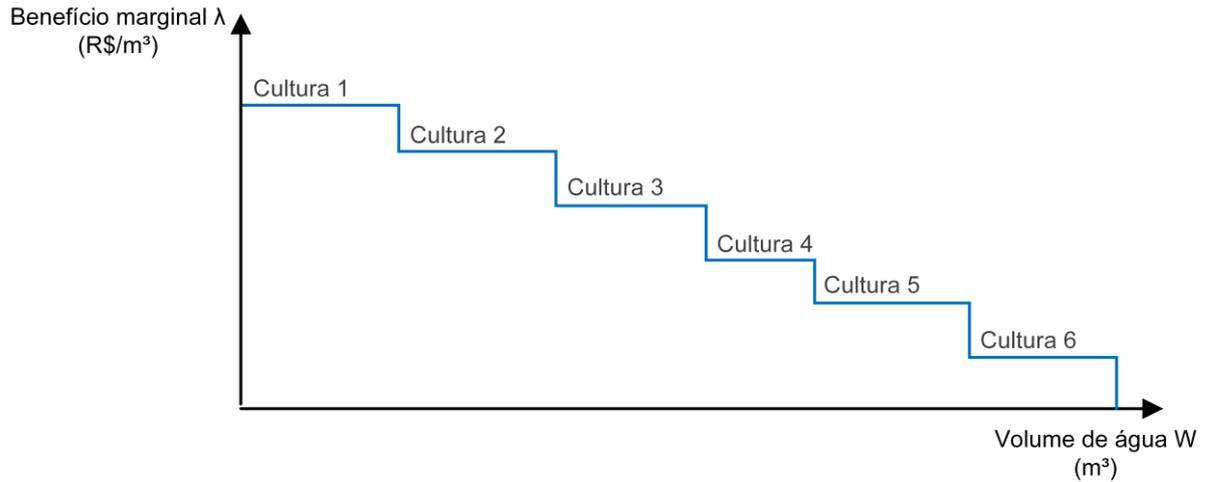


Figura 3.10 - Valor marginal da água no Sistema São Marcos em um dado mês

No entanto, conforme observado na Equação (3.1), a evapotranspiração das culturas, e conseqüentemente sua produtividade de uso da água, em kg/m^3 , é função da evapotranspiração de referência no mês, do coeficiente da cultura no mês, e da precipitação efetiva no mês, o que gera diferentes valores unitários da água para diferentes culturas, para diferentes meses, visto que esses fatores são variáveis ao longo do ano. Caso seja considerada a curva de valor marginal do sistema para o ano inteiro, incluindo as variações mensais de produtividade de uso da água das culturas, é observada uma curva semelhante à observada na Figura 3.11.

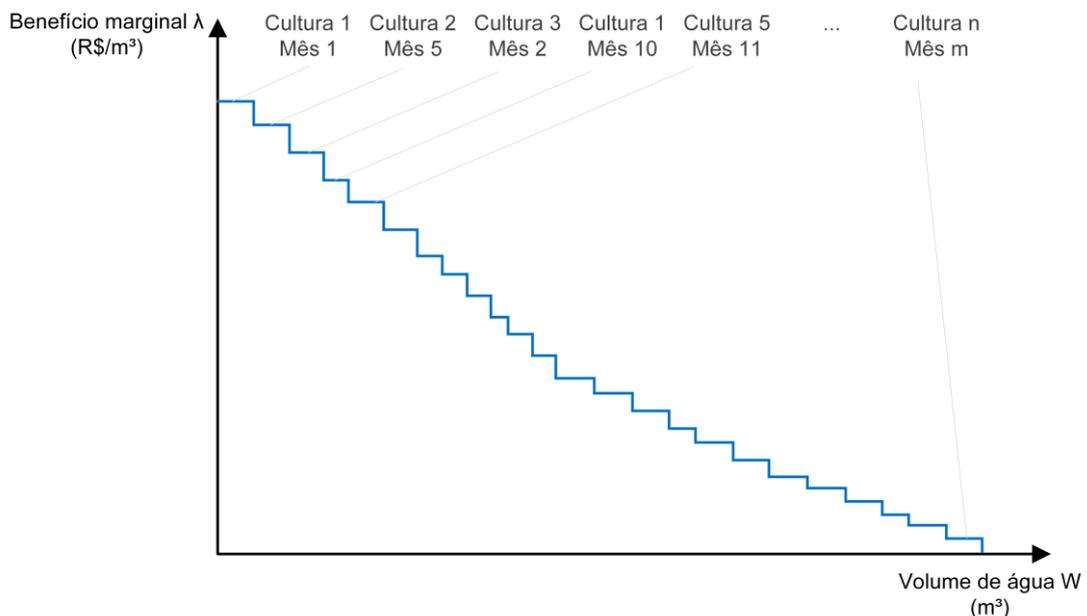


Figura 3.11 - Valor marginal da água no Sistema São Marcos em um dado ano

A curva mostra que as unidades de água possuem valores bastante variáveis no sistema, dependendo do local e do mês na qual elas se encontram disponíveis.

3.2.5.1. Dados de entrada

Os dados empregados para a representação do sistema no modelo hidroeconômico estão apresentados resumidamente na Figura 3.12 e em maior detalhe no Anexo 3.III.

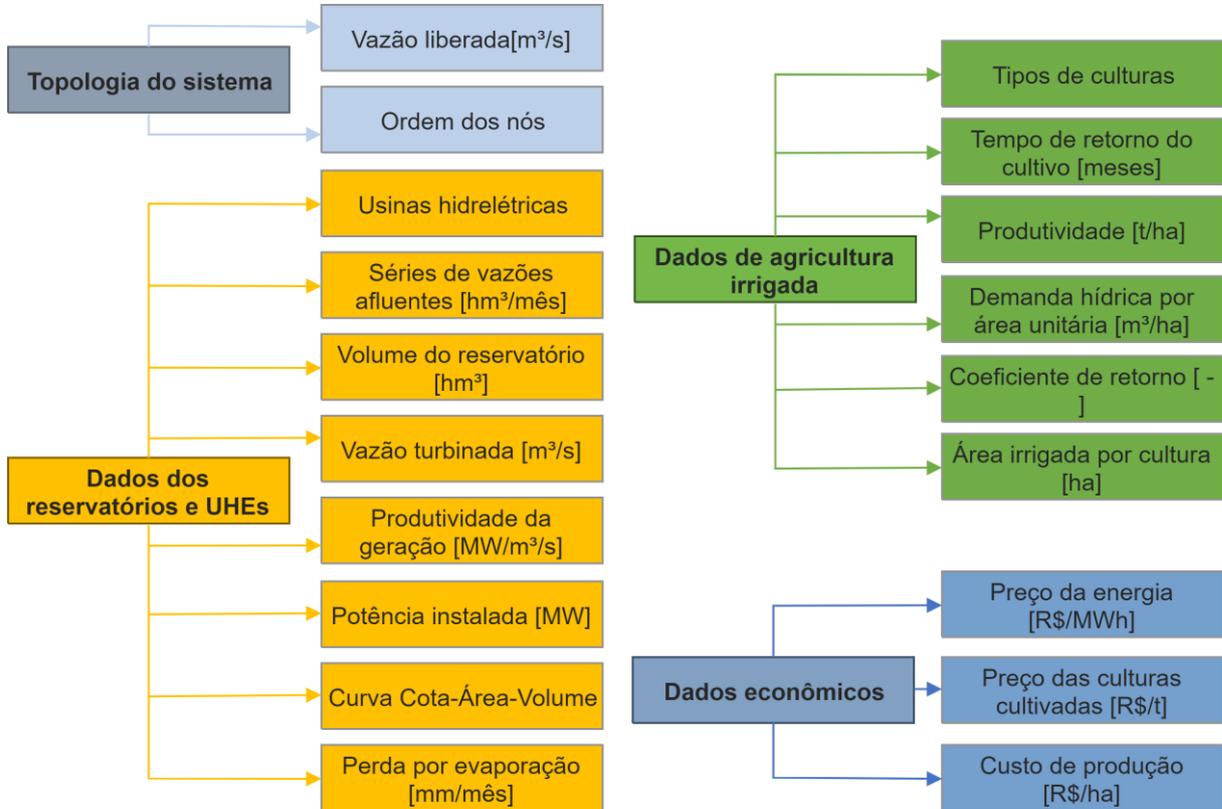


Figura 3.12 - Dados do modelo

3.2.5.2. Dados de saída

Os resultados do modelo variam sutilmente a cada execução, devido à natureza estocástica do mesmo. Não só variam a cada rodada de otimização, como não geram um resultado determinado e único, mas sim um conjunto. A execução do modelo é feita para um intervalo de 60 meses e utilizando as 30 sequências de vazões de entrada geradas internamente pelo modelo autoregressivo. Dessa forma, para cada variável de saída em cada ponto do sistema são produzidas 30 séries temporais com 60 meses de duração. Entretanto, condições de contorno iniciais e finais geram distorções relacionadas à operação. A operação dos reservatórios, por exemplo, é realizada mantendo sempre o volume próximo ao volume máximo de armazenamento, devido às incertezas hidrológicas do futuro. Ao se aproximar do final dos cinco anos simulados, a rodada de otimização deixa de manter essa salvaguarda e turbinada toda a água disponível, deplecionando os reservatórios, visto que para o algoritmo de otimização, o fim dos cinco anos é o fim da operação. Essa situação, no entanto, não encontra contrapartida na realidade, onde a operação dos reservatórios sempre busca manter um volume de segurança para o caso de um evento de escassez futuro, e não existe o “fim” da operação.

Essa distorção na operação dos reservatórios se propaga para o resto do sistema, visto que há um excesso de água disponível próximo ao final da rodada de otimização, que não condiz com o

histórico de operação dos quatro anos anteriores. As condições iniciais também influenciam, variando caso se defina a condição inicial do reservatório como vazio, devido à necessidade de volumes maiores de água para enchê-lo

Para reduzir a influência das condições iniciais e finais, são utilizados apenas os valores do 12º ao 48º mês (os 3 anos intermediários do intervalo de 60 meses), resultando em 30 séries probabilisticamente possíveis, sendo um para cada sequência possível de vazões afluentes q_t .

Considerando m variáveis de saída, com n nós discretizados e t estágios de tempo, serão gerados $m \times n \times t \times 30$ resultados. Para o sistema São Marcos, o modelo possui 15 variáveis de saída, 12 nós e 60 meses, o que geraria 345.600 resultados. Algumas das variáveis estão discretizadas em mais, ou menos, do que 12 nós (como a variável i , discretizada em 36 blocos, ou a variável ib , que se refere ao sistema inteiro), então este número total pode variar um pouco, mas encontra-se nesta ordem de grandeza.

A execução do modelo relacionada à geração de energia hidrelétrica otimiza a operação dos reservatórios e a vazão turbinada, gerando por sua vez, valores médios de potência, que são convertidos em benefício econômico através do preço da energia, em R\$/MWh. A otimização dos reservatórios é feita para ambos os arranjos, energético e econômico. O que varia em relação aos dois arranjos é a priorização que é dada à geração de energia, em relação à maximização de benefício econômico no sistema.

A produção agrícola é baseada nos valores de consumo hídrico das culturas e em um coeficiente k_y (*yield reduction factor*) - um fator de redução da produção em relação à redução de água disponível¹³ - e através dessa produção, gera benefícios econômicos, baseados nos valores de custos fixos (R\$/ha), coeficiente de produção (T/ha), e valor de mercado da cultura (R\$/T). No **arranjo econômico** a água é alocada de forma competitiva entre usos de agricultura irrigada e geração hidrelétrica, de modo a maximizar o retorno econômico total (o resultado é a soma dos retornos da agricultura irrigada e geração hidrelétrica). No **arranjo energético** a água é alocada exclusivamente para a geração de energia hidrelétrica e os resultados são apenas os retornos econômicos da geração hidrelétrica.

As variáveis calculadas nos resultados são geradas em 30 séries temporais de 60 meses de duração cada. Como cada série temporal representa o resultado da realização de um processo estocástico que leva a diferentes vazões afluentes, é possível uma análise das probabilidades e incertezas quanto aos valores de benefícios econômicos e *trade-offs*. Para permitir essa análise, os resultados são organizados em curvas de probabilidade de excedência, relacionando os valores a uma probabilidade de ocorrência.

Quando se diz que uma determinada variável está apresentada com uma probabilidade de ocorrência (excedência) de 90%, significa que para a rodada do modelo, 90% dos resultados do

¹³ O k_y dá a proporção na qual a produção de uma cultura será reduzida dada uma quantidade de água disponível em relação à quantidade de água necessária. Por exemplo: caso uma cultura demande 1 m³ de água e seja entregue 0,5 m³, um $k_y = 1$ reduziria a produção em 50% (visto que foi entregue 50% da água necessária); um $k_y = 0,5$ reduziria a produção em 25%; e um $k_y = 0$ não reduziria a produção.

conjunto são maiores ou iguais àquele valor¹⁴. Analogamente, para uma variável com probabilidade de ocorrência de 10%, significa que apenas 10% dos resultados da nuvem de probabilidade são maiores ou iguais àquele valor.

Os dois cenários representam dois extremos relativos da operação do sistema, em um regime hídrico abundante (os 10% mais úmidos) e escasso (os 10% mais secos, cuja probabilidade de excedência é de 90%).

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Dados de saída do modelo hidroeconômico

Os resultados incluem os dois arranjos de alocação, que configuram o objetivo de maximização de benefício do sistema - energético e econômico - e para os dois cenários de permanência, representando os dois extremos relativos das condições de disponibilidade hidrológica, em um regime hídrico abundante, ou úmido (10%) e escasso, ou seco (90%), gerando quatro conjuntos de dados.

Os quatro conjuntos de resultados estão resumidas no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Conjuntos de resultados

		Cenário de disponibilidade hídrica	
		Cenário com 90% de permanência	Cenário com 10% de permanência
Configuração do modelo	Arranjo econômico	90% de permanência no tempo com arranjo econômico	10% de permanência no tempo com arranjo econômico
	Arranjo energético	90% de permanência no tempo com arranjo energético	10% de permanência no tempo com arranjo energético
	Totais para ambos os arranjos	Curvas de 100% a 0%	

Os cenários de altas e baixas permanências podem indicar dois extremos de comportamentos hidrológicos, e como isso afeta o comportamento do sistema e a geração de benefícios econômico.

Além desses, também são apresentadas as curvas de permanência, de 0 a 100% de probabilidade de ocorrência. Nesse caso são calculados os valores acumulados para cada um dos 3 anos de cada uma das 30 séries temporais. Em seguida é calculada a média dos três anos, resultando em um único valor para cada uma das 30 séries. Esse conjunto de 30 valores então representa o universo de probabilidades para o resultado em questão, que é mostrado na forma de uma curva de probabilidade de excedência.

¹⁴ Algumas variáveis são inversamente proporcionais à disponibilidade hídrica, e nesse caso a permanência de 90% representa que 90% dos resultados são *menores* ou iguais àquele valor, diferentemente das variáveis diretamente proporcionais à disponibilidade, onde 90% dos resultados são *maiores* ou iguais àquele valor.

3.3.1.1. Geração de energia

Neste item serão apresentadas as variáveis que representam o comportamento da geração de energia do sistema São Marcos para os diferentes cenários de permanência. Serão apresentadas as seguintes variáveis, com destaque para a permanência de 90% e 10%:

- **P** - Potência média gerada a cada mês [MW];
- **δ** - Vazão afluente aos reservatórios, a cada mês [hm³];
- **bP** - Benefício econômico gerado nas UHE's oriundo da geração de energia elétrica, a cada mês [R\$].

3.3.1.1.1. Potência média gerada nas UHEs

A energia gerada é calculada priorizando a geração nos meses onde o valor da energia é mais alto e priorizando o armazenamento nos meses onde o valor é mais baixo, embutindo as incertezas hidrológicas futuras nas tomadas de decisões. No presente trabalho não foram consideradas restrições de geração mínima mensal, porém, os resultados não divergem de forma significativa da operação real do sistema onde os volumes turbinados são próximos à capacidade física das unidades geradoras ao longo do ano.

Para o arranjo de alocação econômica, há uma competição entre os usos de agricultura irrigada e geração de energia hidrelétrica, e o modelo aloca a água conforme os usos e meses que vão gerar o maior benefício total no sistema, respeitando as restrições de disponibilidade hídrica, armazenamento e topologia do sistema.

Para o arranjo de alocação energética, a geração de energia é a fonte prioritária de benefícios, e a vazão disponível é alocada prioritariamente para esse uso, nos meses de maior valor, respeitando as restrições de disponibilidade hídrica, armazenamento e topologia do sistema.

Na Figura 3.13 estão apresentados os resultados da rodada de otimização para os dois cenários de permanência (90% e 10%) e os dois arranjos de alocação (econômico e energético).

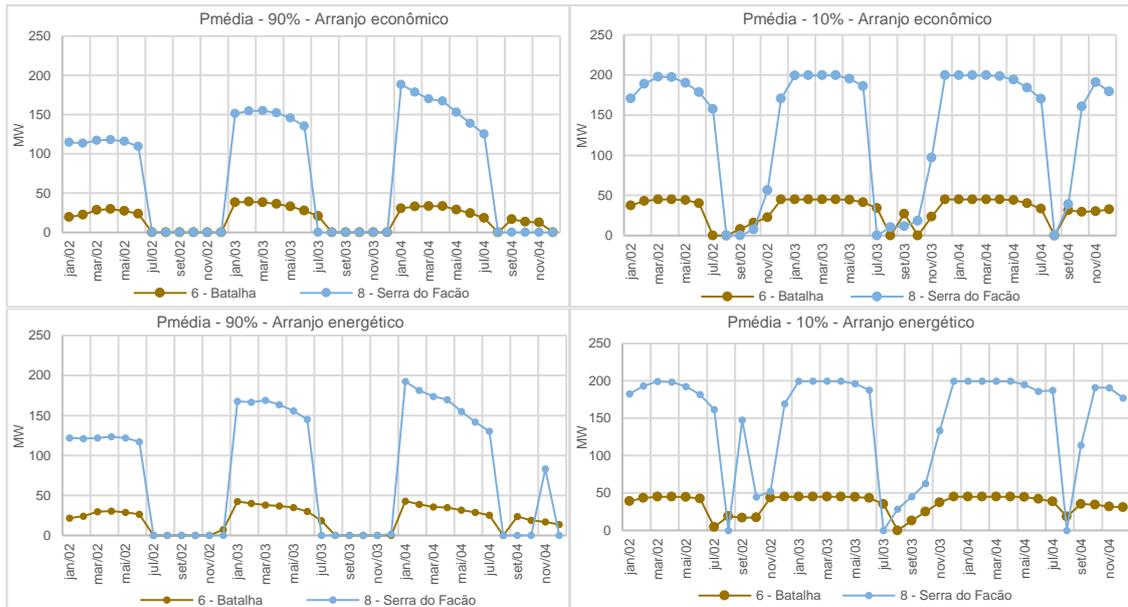


Figura 3.13 - Potência média gerada mensal, para os dois cenários de permanência e arranjos de alocação

Observa-se nessas curvas os efeitos de alguns comportamentos do modelo de otimização, que visa maximizar a geração de benefícios econômico gerado nas usinas. A consequência disso é a reservação, em detrimento da geração, nos meses onde o preço da energia é mais baixo. Para os meses de regime hídrico mais úmido, são menos meses onde se prioriza a reservação, visto que há mais meses onde as turbinas atingem sua capacidade máxima, e a necessidade de reservação, nos meses onde o valor da energia é mais baixo, diminui.

Na Figura 3.14 estão apresentadas as curvas de permanência para o valor médio do montante total de energia gerada em um ano na operação das duas usinas.

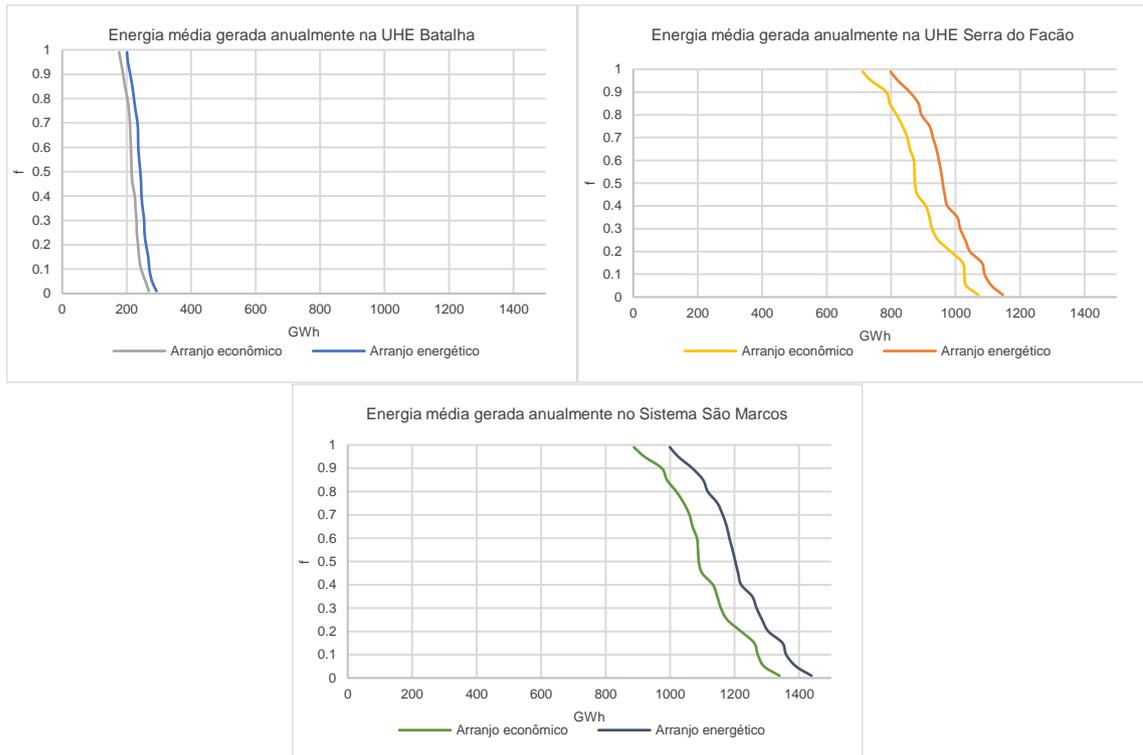


Figura 3.14 - Curva de permanência para a energia anual média gerada nas UHEs e no sistema

A partir dessas curvas é possível observar os impactos da agricultura irrigada na geração de energia. No arranjo energético, o sistema produz 1.068 GWh/ano em 90% dos anos, podendo chegar a 1.360 GWh/ano nos 10% mais úmidos. Ao introduzir a produção agrícola irrigada no arranjo econômico, o modelo identificou que o retorno econômico total do sistema poderia ser aumentado realocando água para esse setor. Isto é, em vista do tamanho da área irrigada e valor das culturas em relação à potência instalada nas UHEs, o ganho econômico da produção agrícola superou a perda econômica da produção de energia (em Batalha e Serra do Facão).

É importante ressaltar que esse resultado depende das condições de contorno do problema, que aqui não foram consideradas de forma explícita. A água que flui a jusante do sistema irá gerar energia e valor adicional em toda a cascata de reservatórios do rio Paraná. Por outro lado, também estará disponível para outros usos de agricultura irrigada não considerados. Para atenuar essa limitação, foi considerado o valor da energia igual ao *preço de liquidação das diferenças* (PLD), que reflete o custo marginal de operação (CMO) de todo o Sistema Interligado Nacional (CCEE, 2017). Em outras palavras, é o custo de se produzir uma unidade adicional de energia (MWh) em todo o SIN.

A realocação de água para a produção agrícola no modelo alterou a energia produzida anualmente para 974 GWh/ano em 90% dos anos (94 GWh/ano ou 8,8% a menos). Em anos mais úmidos esse impacto é ligeiramente menor e a energia produzida poderia chegar a 1.272 GWh/ano (6,5% a menos). No Quadro 3.7 estão apresentadas as informações de energia anual média gerada ao longo dos três anos de rodada de otimização para os dois cenários e dois arranjos, em cada UHE, bem com as variações entre os cenários, e entre os arranjos.

Quadro 3.7 - Energia gerada anual média para os dois cenários e dois arranjos, em cada UHE e no sistema

Arranjo	Cenário	Energia gerada (GWh)			
		Batalha	Serra do Facão	Total	
Arranjo energético	90% (mais seco)	211,06	857,68	1.068,75	
	10% (mais úmido)	270,25	1.089,80	1.360,05	
Arranjo econômico	90% (mais seco)	189,02	785,16	974,18	
	10% (mais úmido)	244,77	1.027,22	1.272,00	
Variação entre os arranjos	90%	Absoluta	22,05	72,52	94,57
		%	10,4%	8,5%	8,8%
	10%	Absoluta	25,48	62,58	88,06
		%	9,4%	5,7%	6,5%

Ressalta-se que a potência para geração da energia firme nas usinas é de 48,8 MW para a UHE Batalha e 182,4 MW para a UHE Serra do Facão. Observando os gráficos da Figura 3.13 é possível averiguar que para o cenário de 90% de permanência, são poucos os meses onde a garantia firme é satisfeita sob o arranjo econômico, embora a situação melhore um pouco no anos mais úmidos (10% de permanência). Conforme apresentado na Figura 3.6, essa situação é ainda mais crítica no comportamento real, do que no calculado pelo modelo, devido ao período de dados real ter sido mais seco do que a série considerada no modelo. Além disso, como já destacado, o emprego de um modelo de otimização irá produzir um limite superior em termos de desempenho do sistema.

3.3.1.1.2. Vazão afluente aos reservatórios

A vazão afluente aos reservatórios é função da vazão natural do sistema, incremental em cada nó, dos usos agrícolas a montante do reservatório, e da operação da UHE de montante (no caso, a operação da UHE Batalha influenciando na vazão afluente do reservatório de Serra do Facão).

Na Figura 3.15 estão apresentados os resultados do modelo hidroeconômico para os dois cenários de permanência (90% e 10%) e os dois arranjos de alocação (econômico e energético).

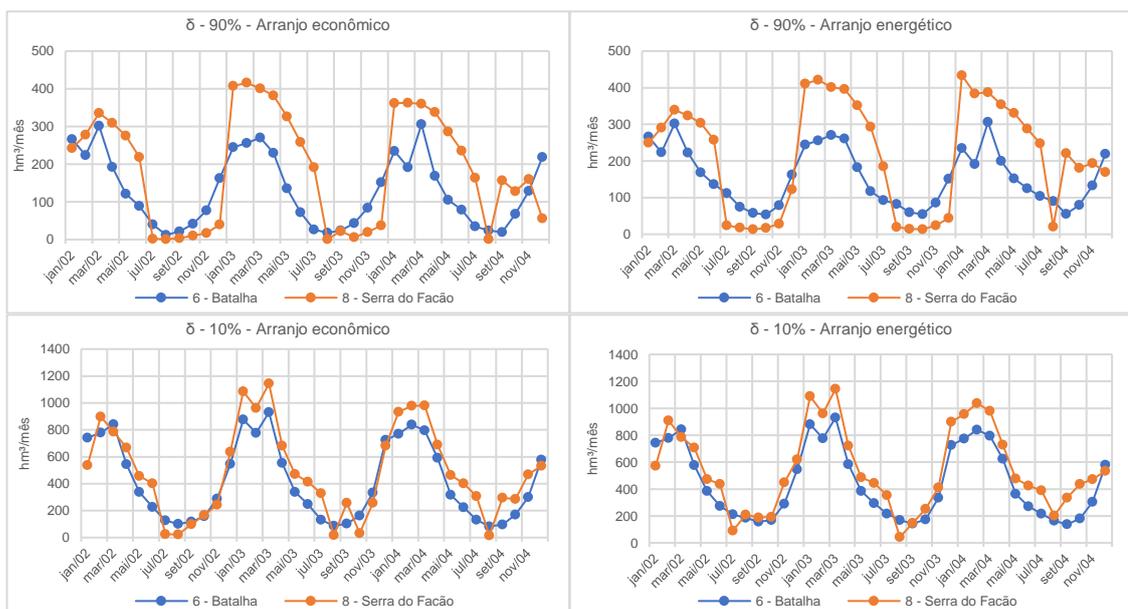


Figura 3.15 - Vazão afluente aos reservatórios a cada mês, para os dois cenários de permanência e arranjos de alocação

As vazões afluentes em Batalha são cíclicas, variando conforme a disponibilidade hídrica natural, enquanto que em Serra do Facão, as vazões afluentes são afetadas pelo comportamento da UHE Batalha, cuja operação influencia a entrada de água no reservatório de Serra do Facão, sendo essas mais irregulares. Como os volumes turbinados em Batalha são da ordem de 100 a 300 hm³/mês, os impactos sobre Serra do Facão são mais proeminentes no cenário de baixa disponibilidade (90%), do que no mais úmido (10%).

Esta variável representa a vazão afluente, mas não necessariamente está relacionada à energia ou ao benefício econômico gerado em cada mês, visto que a tomada de decisão nos reservatórios pode ser de armazenar essa vazão afluente para uso futuro, e não necessariamente turbiná-la naquele mês.

Na Figura 3.16 estão apresentadas as curvas de permanência para o valor médio das vazões afluentes totais em um ano aos dois reservatórios.

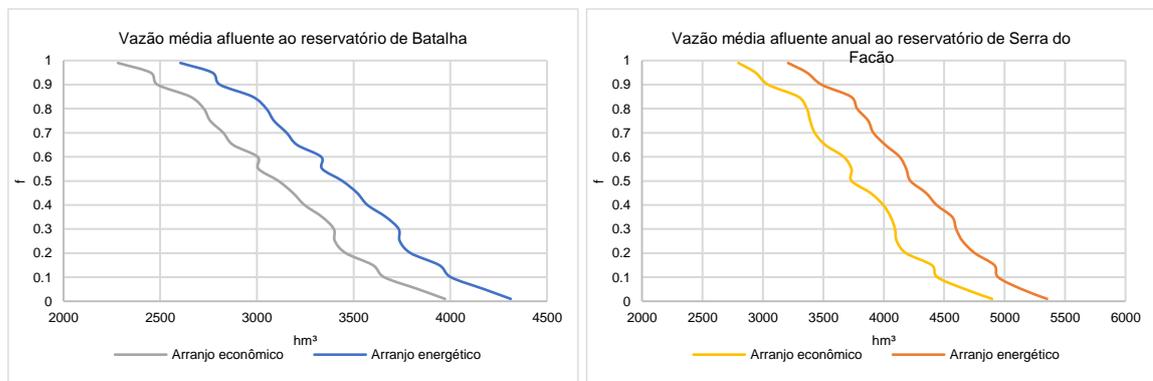


Figura 3.16 - Curva de permanência para vazão afluente anual média aos reservatórios

De forma semelhante ao que ocorre em relação à energia gerada, é possível observar os impactos da agricultura e da variabilidade hidrológica nas vazões afluentes aos reservatórios.

No Quadro 3.8 estão apresentados os valores totais de vazão afluente nos dois cenários de destaque, e nos dois arranjos de alocação, bem como a variação observada entre os arranjos.

Quadro 3.8 - Vazão afluente anual média nos dois cenários e dois arranjos

Arranjo	Cenário	Vazão afluente (hm ³ /ano)		
		Batalha	Serra do Facão	
Arranjo energético	90% (mais seco)	2.842,89	3.724,06	
	10% (mais úmido)	3.973,63	4.901,25	
Arranjo econômico	90% (mais seco)	2.485,75	3.042,57	
	10% (mais úmido)	3.658,36	4.443,34	
Variação	90%	Absoluta	357,14	681,49
		%	12,56%	18,30%
	10%	Absoluta	315,27	457,91
		%	7,93%	9,34%

A UHE Serra do Facão foi a mais impactada nos dois cenários, com uma perda de 18,3% da vazão afluente no cenário mais seco, e 9,34% no cenário mais úmido. Isso é esperado, visto que há mais agricultura irrigada à montante de Serra do Facão do que de Batalha, e que parte do impacto é

agravado pela própria operação de Batalha, que tende a encher seus reservatórios ante a incerteza da escassez futura. É possível observar, também, que no cenário mais seco, o impacto em ambas as usinas é maior.

3.3.1.1.3. Benefícios econômicos oriundos da geração de energia hidrelétrica

Os benefícios econômicos advindos da geração de energia hidrelétrica são funções da energia gerada e do preço da energia no mês em que a vazão é turbinada. Esta é a variável a ser maximizada na otimização da operação dos reservatórios no sistema São Marcos.

Na Figura 3.17 estão apresentadas as curvas de permanência para o valor médio anual dos benefícios econômicos totais anuais advindos da energia gerada nas usinas e no sistema.

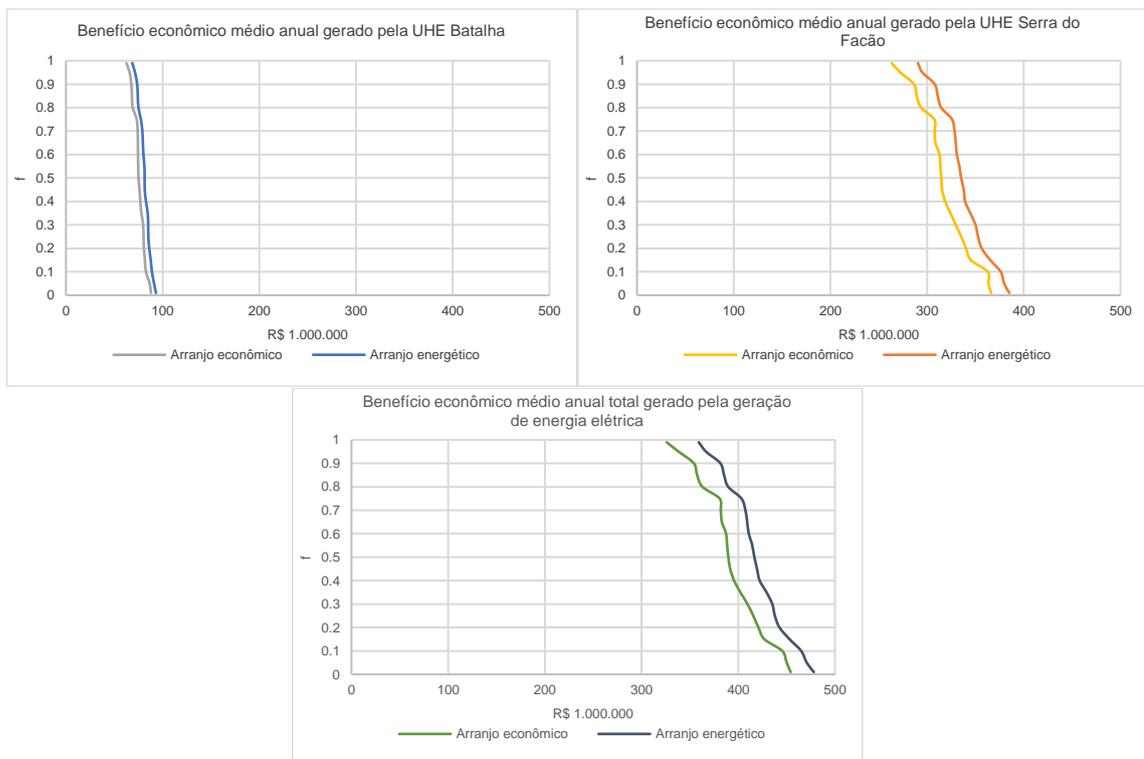


Figura 3.17 - Curvas de permanência dos benefícios econômico oriundos da geração de energia elétrica nas UHEs e no sistema

No Quadro 3.9 estão apresentados os valores de benefícios gerados anuais médios para os três anos de rodada de otimização, para os dois cenários de permanência em destaque e arranjos de alocação.

Quadro 3.9 - Benefício econômico gerado nos dois cenários e dois arranjos, em cada UHE e no sistema

Arranjo	Cenário	Benefício gerado (R\$ milhões/ano)			
		Batalha	Serra do Facão	Sistema	
Energético	90% (mais seco)	R\$ 73,64	R\$ 307,86	R\$ 381,50	
	10% (mais úmido)	R\$ 88,89	R\$ 376,14	R\$ 465,04	
Econômico	90% (mais seco)	R\$ 67,58	R\$ 286,46	R\$ 354,04	
	10% (mais úmido)	R\$ 82,68	R\$ 362,74	R\$ 445,42	
Variação	90%	Absoluta	R\$ 6,06	R\$ 21,39	R\$ 27,45
		%	8,23%	6,95%	7,20%
	10%	Absoluta	R\$ 6,21	R\$ 13,40	R\$ 19,61
		%			

Arranjo	Cenário		Benefício gerado (R\$ milhões/ano)		
			Batalha	Serra do Facão	Sistema
		%	6,99%	3,56%	4,22%

Há uma redução de R\$ 27.459.190/ano no benefício gerado pela geração de energia hidrelétrica no sistema, em 90% dos anos, sendo que nos anos mais úmidos (10%) a diferença cai para R\$ 19.616.128/ano. Estes valores representam os reflexos econômicos da alocação da água para a agricultura no benefício econômico advindo da geração de energia no sistema São Marcos. Cabe destacar que os valores são calculados considerando-se o valor marginal da energia no sistema hidrotérmico Brasileiro, representado pelo PLD. Essa diferença seria igual ao custo de se comprar a energia que deixou de ser gerada no mercado de curto prazo e pagando o PLD.

3.3.1.2. Agricultura irrigada

Neste item serão apresentadas as variáveis que representam o comportamento da agricultura irrigada do sistema São Marcos para os cenários de permanência no arranjo econômico. Serão apresentadas as seguintes variáveis, com destaque para a permanência de 90% e 10%:

- **w** - Retiradas de água nos nós de uso agrícola, em cada mês [hm³]
- **bw** - Benefícios mensais gerados pelo uso da água na agricultura [R\$]

O arranjo energético não calculou os usos para a agricultura irrigada, buscando apenas maximizar a geração de forma prioritária fazendo o uso da maior quantidade de água possível.

3.3.1.2.1. Vazões retiradas de água nos nós agrícolas

As vazões de retirada são aquelas retiradas dos nós e direcionadas para o uso agrícola. Da vazão retirada, considera-se uma eficiência de irrigação de 80% (MMA, 2011). Dos 20% restantes, há uma eficiência de retorno de 30% para o nó de jusante (TILMANT; PINTE; GOOR, 2008). Dessa forma, apenas 6% da vazão de retirada **w** retorna ao sistema de forma disponível.

Na Figura 3.18 estão apresentados os usos agrícolas para os seis nós de irrigação do sistema.

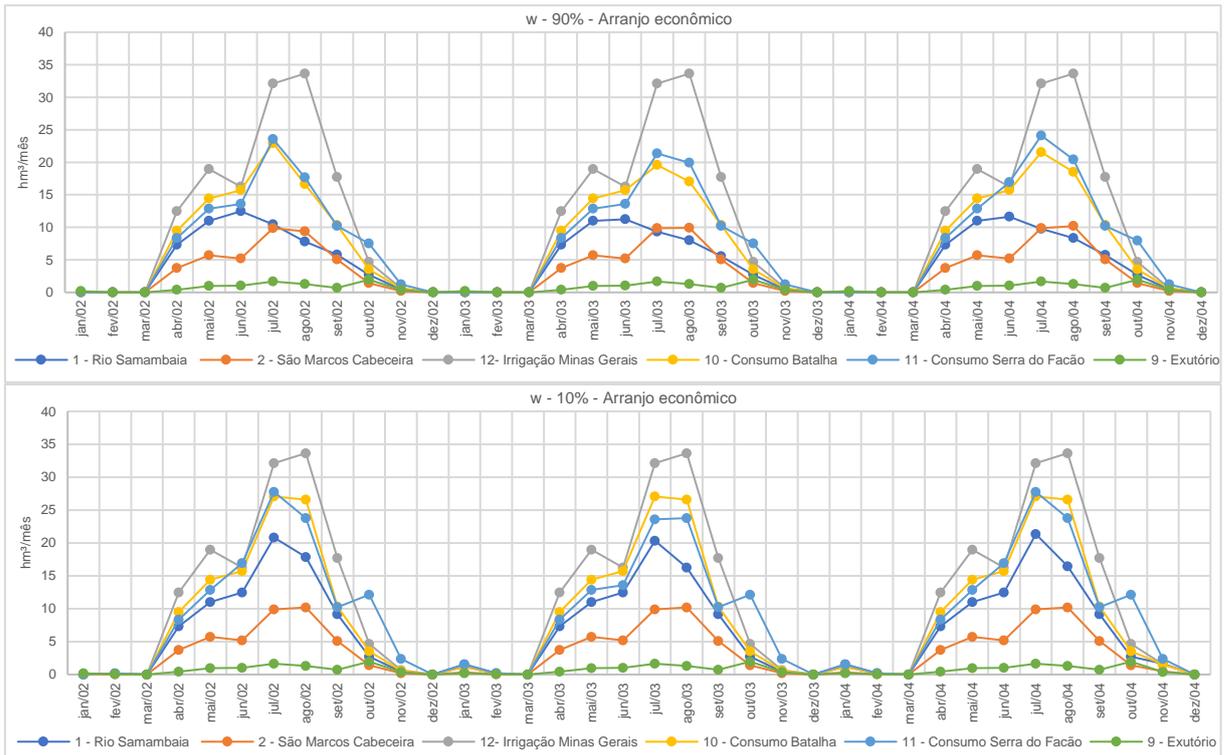


Figura 3.18 - Vazão retirada para agricultura irrigada a cada mês, para os dois cenários de permanência no arranjo econômico

As maiores vazões retiradas se dão no nó 12 (Irrigação Minas Gerais), seguido do nó 10 (Consumo Batalha) e 11 (Consumo Serra do Facão), 1 (Rio Samambaia), 2 (São Marcos Cabeceira) e por fim 9 (Exutório), com os menores volumes retirados.

Na Figura 3.19 estão apresentadas as curvas de permanência para as demandas anuais médias retiradas nos nós de irrigação e no sistema.



Figura 3.19 - Curva de permanência das demandas anuais médias retiradas para irrigação em cada nó, e no sistema

Há variação entre os percentuais de permanência, o que indica que há déficit no atendimento às demandas totais para agricultura, devido à variabilidade hidrológica (pois caso 100% das demandas fossem atendidas, a variabilidade hidrológica não iria impactar na vazão retirada).

No Quadro 3.10 são apresentadas as demandas de evapotranspirações reais e demandas hídricas para a irrigação, bem como as retiradas de água para os cenários de 90% e 10%, nos seis nós de irrigação e no total.

A evapotranspiração real corresponde à água que a planta necessita para alcançar sua produtividade máxima, e a demanda hídrica considera a ineficiência do sistema de irrigação, ou seja, é a vazão que necessita ser captada, para que, desconsiderada a eficiência de aplicação, seja entregue à planta a demanda. A eficiência da irrigação adotada para o sistema é de 80%, e a eficiência de retorno - isto é, a fração do que não é utilizado pelas culturas que retorna ao sistema - é de 30%. Com isso, 6% (20% de 30%) da demanda hídrica retorna ao sistema.

Quadro 3.10 - Demandas, vazões de retirada e déficits anuais para a agricultura irrigada, para os dois cenários de permanência no arranjo econômico

Nó		Demanda Hídrica (hm ³ /ano)	Retirada de água para irrigação (hm ³ /ano)		Déficit (demanda-retirada) (hm ³ /ano)	
#	Nome		90% (mais seco)	10% (mais úmido)	90% (mais seco)	10% (mais úmido)
1	Rio Samambaia	106,6	64,0	74,1	42,6	32,5
2	São Marcos Cabeceira	45,6	40,7	41,7	4,9	3,9
12	Irrigação Minas Gerais	150,1	136,7	137,6	13,4	12,5
10	Consumo Batalha	122,1	99,2	108,0	22,9	14,1
11	Consumo Serra do Facão	118,8	102,4	111,0	16,4	7,8
9	Exutório	8,6	8,6	8,6	0,0	0,0
Total		551,7	451,6	481,0	100,1	70,7

Do total da demanda de 551,7 hm³/ano, 451,6 hm³/ano podem ser atendidos em 90% dos anos (déficit de 100 hm³/ano), e até 481 hm³ nos anos mais úmidos (10% permanência), correspondendo a 70,7 hm³/ano da demanda não atendida (déficit). Esse resultado indica que mesmo em condições hidrológicas favoráveis, ainda há um déficit (água é escassa no sistema), concentrando-se nos nós de cabeceira. Isso se dá porque nas regiões de cabeceira, com menores áreas de drenagem há consequentemente menores vazões, e que não podem ser alocadas de outros pontos do sistema.

Os resultados do modelo no arranjo econômico representam a maximização do retorno econômico total (soma dos retornos da geração hidrelétrica e da agricultura irrigada). Os resultados indicam que a agricultura irrigada recebeu alocação de água capaz de suprir 82% da sua demanda em 90% dos anos, e capaz de suprir 87% da demanda em 10% dos anos.

3.3.1.2.2. *Benefícios econômicos oriundos do uso na agricultura irrigada*

A água utilizada na agricultura irrigada gera benefícios baseados nos custos de produção, produtividade e preço de mercado das culturas agrícolas. Caso não seja suprida toda a demanda necessária, a produtividade é reduzida na mesma proporção do déficit de água, no mês em que ocorreu escassez.

Na Figura 3.20 estão apresentadas as curvas de permanência para os benefícios anuais médios gerados pela agricultura irrigada nos nós de irrigação e no sistema. A distribuição de probabilidades reflete a variabilidade hidrológica capturada pelas 30 séries de vazões afluentes empregadas pelo modelo. Conforme mostrado na Figura 3.9 e no Quadro 3.5, os nós 1, 2, 10 e 12 representam áreas irrigadas na cabeceira do sistema, a montante da UHE Batalha. O nó 11 representa as áreas irrigadas

a montante da UHE Serra do Facão (e a jusante da UHE Batalha) e o nó 9 as áreas irrigadas no trecho final do sistema, a jusante de ambas as UHEs.

É interessante notar que o trecho final de jusante (nó 9), embora apresente o menor retorno econômico, também não apresenta variação neste, beneficiado pelo efeito de regularização dos reservatórios. Verifica-se também que a maior parte do retorno econômico (74,8% do retorno total em 90% do tempo) se localiza na cabeceira do sistema, a montante da UHE Batalha.

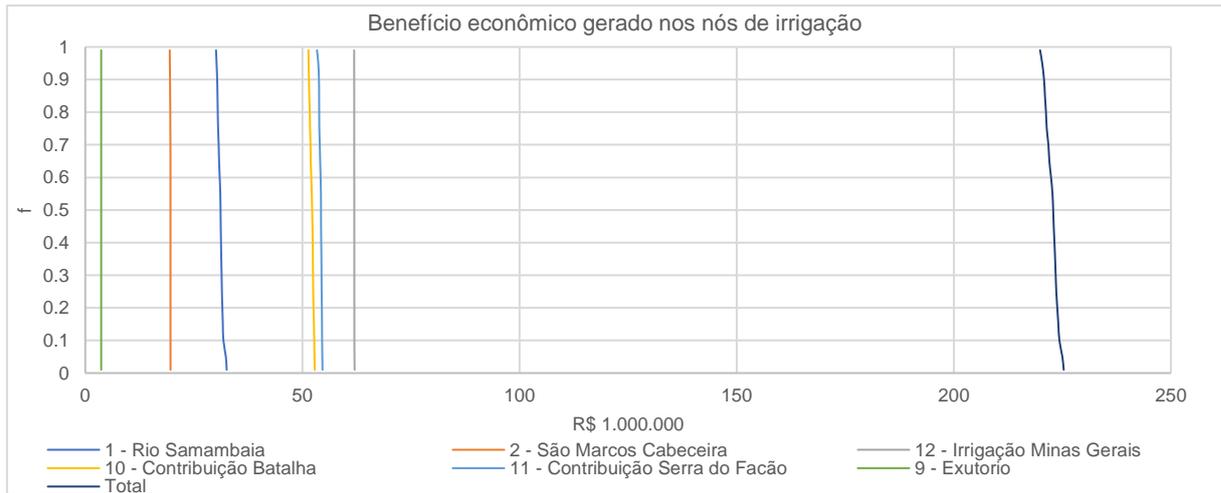


Figura 3.20 - Curva de permanência dos benefícios econômicos gerados pela irrigação em cada nó do sistema

Como observado no comportamento da variável “vazões de retirada”, a variabilidade hidrológica impõe uma variabilidade nos benefícios econômicos, que é apresentada no Quadro 3.11, para os cenários de 90% e 10% de permanência.

Quadro 3.11 - Benefício gerado pela agricultura irrigada nos dois cenários, em cada nó de irrigação

Nó		Benefício gerado na agricultura irrigada (R\$ milhões/ano)		Diferença no benefício	
#	Nome	90% (mais seco)	10% (mais úmido)	R\$ Milhões/ano	%
1	Rio Samambaia	R\$ 30,37	R\$ 31,81	R\$ 1,43	4,50%
2	São Marcos Cabeceira	R\$ 19,51	R\$ 19,62	R\$ 0,11	0,55%
12	Irrigação Minas Gerais	R\$ 61,93	R\$ 61,97	R\$ 0,04	0,06%
10	Consumo Batalha	R\$ 51,50	R\$ 52,73	R\$ 1,23	2,33%
11	Consumo Serra do Facão	R\$ 53,81	R\$ 54,54	R\$ 0,73	1,34%
9	Exutório	R\$ 3,66	R\$ 3,66	R\$ 0,00	0,00%
Total		R\$ 220,78	R\$ 224,32	R\$ 3,54	1,58%

A variabilidade hidrológica pode gerar uma diferença de, ao menos, R\$ 3,54 milhões/ano, comparando condições mais favoráveis (10% de permanência) com as menos favoráveis (90% de permanência), em termos de disponibilidade hídrica. Considerando todo o sistema, essa diferença equivale a 1,58% do benefício nos anos mais úmidos (10% de permanência). Entretanto, a diferença não é uniforme no sistema. Observa-se, no Quadro 3.11, que a maior parte se encontra a montante da UHE Batalha, nos nós 1, 2, 12 e 10 (R\$ 2,81 milhões ou 7,44%). O nó Rio Samambaia está sujeito a uma variação de R\$ 1,43 milhões, o que equivale a 4,5% do seu benefício nos anos mais favoráveis (10% de permanência) e a quase metade da diferença total do sistema. Os trechos a jusante dos reservatórios, a exemplo dos nós 11 e 9, ao se beneficiarem do efeito de regularização apresentam

menores diferenças. Entretanto, os nós 2 e 12 encontram-se a montante e também apresentam uma diferença reduzida. Uma possível explicação encontra-se no valor da produção nessas regiões, associada a diferenças na disponibilidade hídrica local.

3.3.1.3. Análise integrada do Sistema

Neste item serão apresentadas as variáveis que representam o comportamento do sistema como um todo para os cenários de permanência. Serão apresentadas as seguintes variáveis, com destaque para a permanência de 90% e 10%:

- λ - Valor marginal da água nos nós, em cada mês [R\$/1.000m³]
- **ib** - Benefícios totais gerados no sistema São Marcos em cada mês [R\$]

Ressalta-se que as vazões afluentes (naturais) são as mesmas para ambos os arranjos (energético e econômico), visto que a manutenção das mesmas condições hidrológicas é imprescindível à comparação dos dois arranjos de alocação, e varia apenas para os cenários de permanência. O comportamento das demais variáveis em relação ao arranjo são consequências da hidrologia e decisões de alocação. O valor marginal da água é obtido a partir do multiplicador de Lagrange associado à equação de balanço hídrico no modelo de otimização hidroeconômico em cada nó do sistema.

3.3.1.3.1. Valor marginal da água

Uma das variáveis mais importantes geradas pelo modelo hidroeconômico é o multiplicador de Lagrange (λ) associado à equação de balanço de massa. Os valores λ representam o valor marginal da água, que corresponde ao incremento na função objetivo do modelo resultado de uma unidade adicional de água em um determinado ponto e instante. Esse incremento é uma estimativa do valor econômico que uma unidade adicional de água agregaria ao sistema, naquele ponto, naquele instante. Essa variável também representa o *custo de oportunidade marginal da água*, indicando o benefício econômico que poderia ser produzido se uma unidade adicional de água fosse realocada de outro local do sistema para o ponto em questão. Na representação do sistema pelo modelo hidroeconômico, um ponto é representado por um nó, que pode ser um reservatório ou um nó de demanda.

Na Figura 3.21 estão apresentadas as séries temporais de valor marginal para os resultados do modelo hidroeconômico para os dois cenários de permanência (90% e 10%) e os dois arranjos de alocação: energético e econômico.

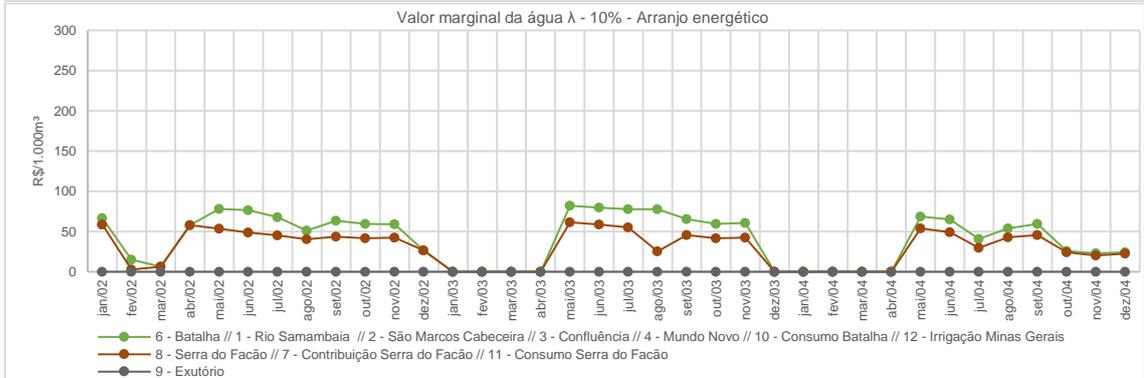
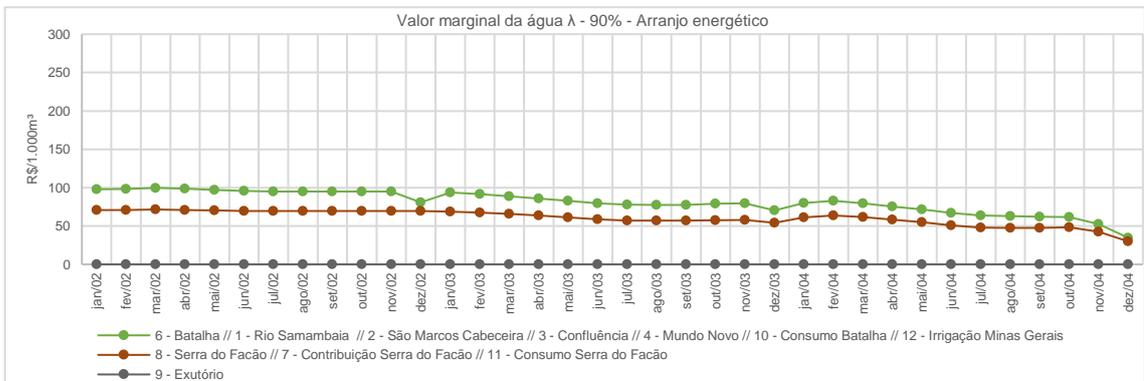
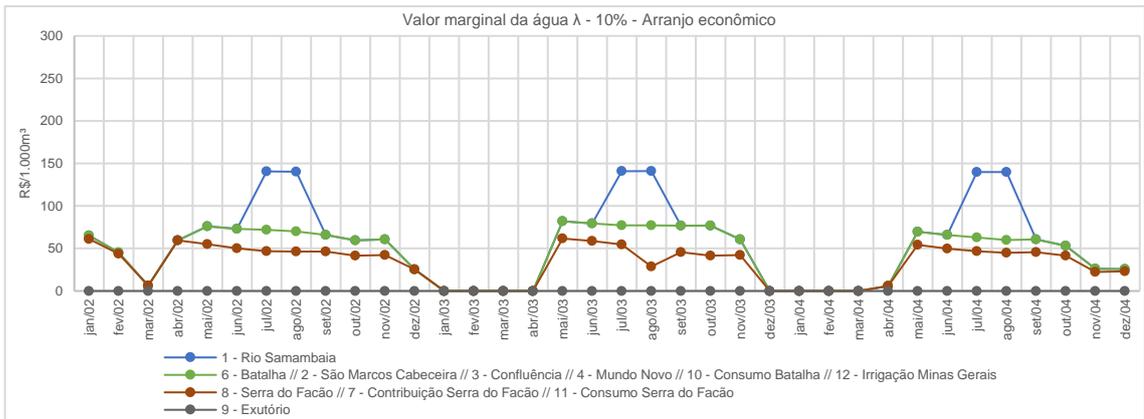
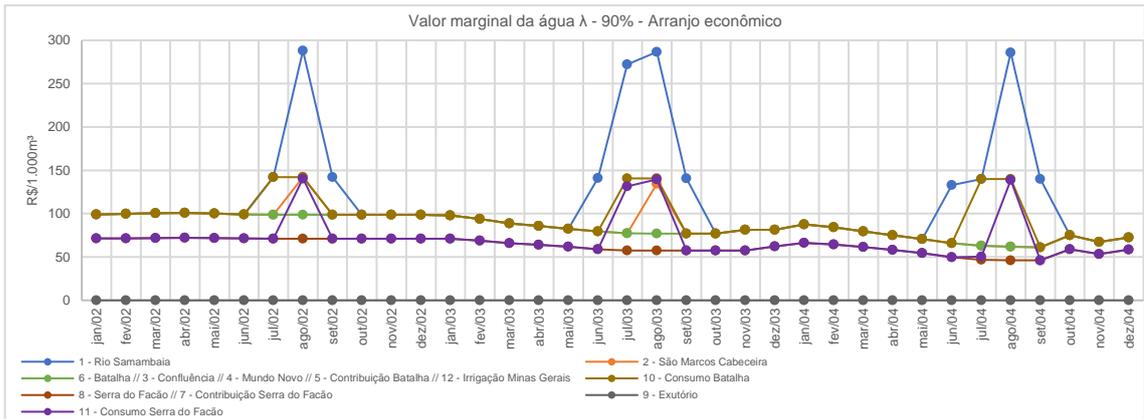


Figura 3.21 - Valor marginal da água nos nós a cada mês, para os dois cenários de permanência e arranjos de alocação

Foram apresentados quatro esquemas de configuração do sistema, para os dois cenários e para os dois arranjos. O valor marginal é igual a zero quando não existe benefício a ser obtido de uma

unidade extra de água, e cresce conforme aumenta a escassez. Os valores marginais no nó 9 (Exutório) resultam em valor igual a zero uma vez que usos a partir desse ponto não são modelados nesse trabalho.

Observando o primeiro esquema (90% de permanência no arranjo econômico), observam-se picos de valor marginal chegando a valores próximos de R\$ 0,30/m³ no nó 1 para o mês de julho e agosto - os meses de maior demanda. Esse pico se dá devido a uma escassez momentânea de água neste nó, neste mês, devido ao fato de ser um nó de montante, em um ponto de pequena área de drenagem. Conforme há um deslocamento para jusante, essa situação se torna cada vez mais improvável de ocorrer, visto que a operação do sistema alocará água para aquele nó, caso haja necessidade. Fora dos nós de cabeceira, os valores marginais da água estão na faixa dos R\$ 0,07/m³ a R\$ 0,1/m³. Ao longo dos demais meses nota-se uma redução a partir de janeiro, se estendendo até março. Esses são meses onde o total de água demandada dos mananciais é a mais baixa devido ao período de chuvas, o que reflete no valor marginal a água. A partir de agosto os valores de λ voltam a subir gradualmente.

O cenário de 10% para o arranjo econômico também apresenta picos de valor marginal, embora não tão altos quanto o de 90%. Isso ocorre porque a água é mais abundante neste cenário, e não ocorrem cenários de escassez da mesma magnitude do primeiro esquema. Para o cenário de 10% (mais úmido), também ocorrem períodos onde o valor marginal é zero, indicando que as demandas do sistema estão plenamente satisfeitas nestes meses, e unidades adicionais de água não agregariam valor ao sistema.

No cenário de 90% para o arranjo energético, onde a água é alocada exclusivamente para a geração de energia, o valor marginal fica um pouco abaixo do "platô" de valores do cenário de 90% no arranjo econômico, pois há mais disponibilidade de água para geração hidrelétrica, e o valor marginal diminui conforme aumenta a disponibilidade. Também ocorre uma diminuição gradual dos valores ao longo da rodada de otimização, devido ao problema da aproximação do fim do período simulado, já discutido anteriormente, onde a rodada de otimização prioriza o esvaziamento dos reservatórios, dada a proximidade do fim da rodada de otimização.

Por fim, para o cenário de 10% de permanência no arranjo energético, a situação é semelhante ao cenário de 10% no arranjo econômico, sem a presença dos picos de valor marginal. Há meses onde o valor marginal é zero, porque naqueles meses foi possível turbinar na vazão máxima, e a potência nominal da UHE foi atingida, fazendo com que novas unidades de água não gerassem nenhum benefício econômico adicional naquele mês, ao mesmo tempo em que o volume do reservatório está próximo ao máximo. Nesses períodos, novas unidades de água não podem nem ser armazenadas, pois os reservatórios estão cheios, e por isso não agregam nem mesmo valor futuro ao sistema (na forma de volume armazenado). No arranjo econômico os valores menores estão nos mesmos níveis das curvas no arranjo energético. Isso se dá nos momentos onde a demanda para agricultura irrigada é suprida, e a geração de benefício de unidades adicionais de água se dá apenas na geração de energia.

Na Figura 3.22 estão apresentadas as curvas de permanência para os valores marginais médios, nos arranjos econômico e energético.

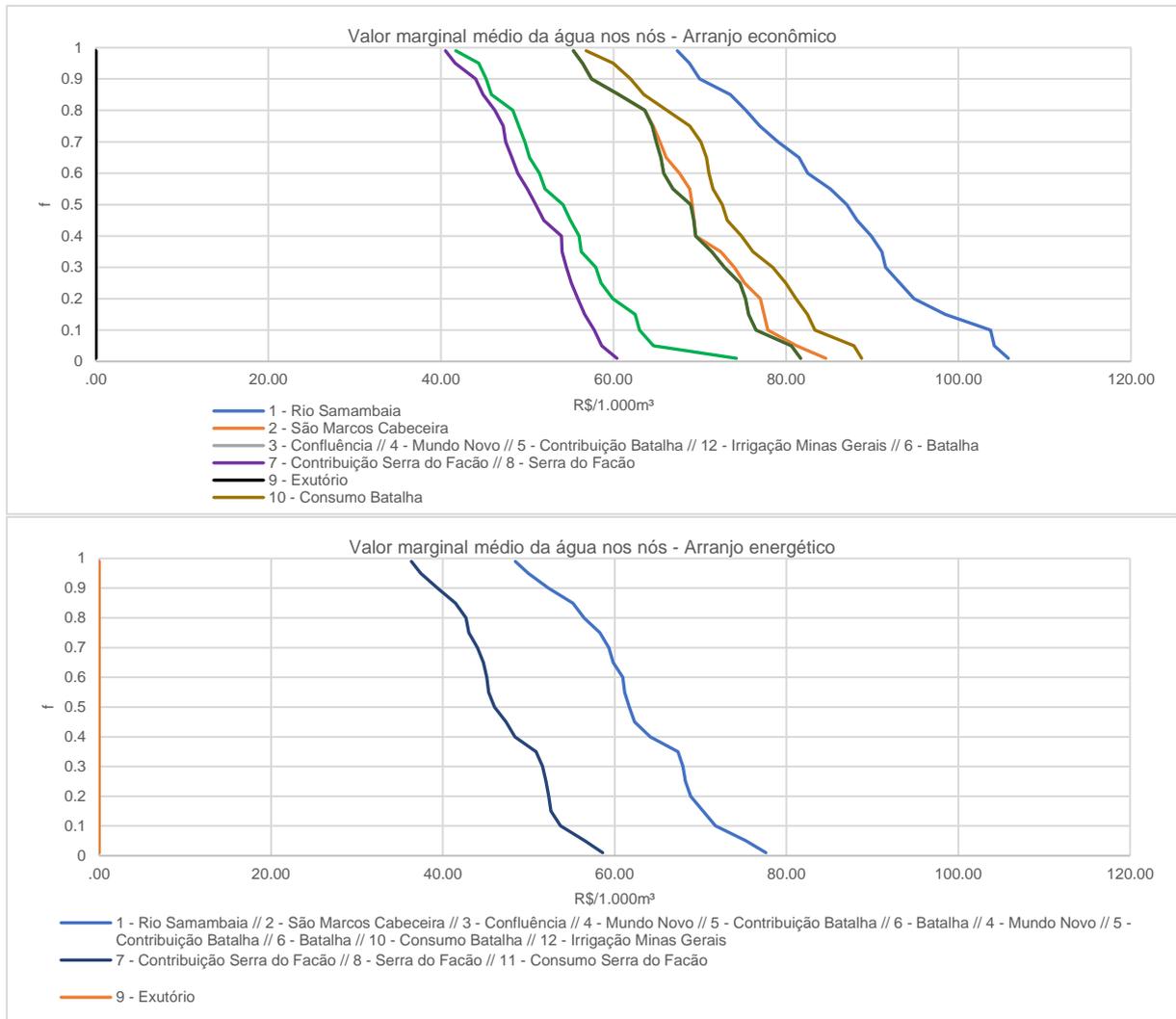


Figura 3.22 - Curva de permanência dos valores marginais médios

Destaca-se ainda o comportamento dessas curvas, que se agrupam em “degraus” de curvas referentes a diferentes nós sobrepostas. No arranjo energético há três níveis, com os valores dos nós se concentrando em Batalha, Serra do Facão e o nó do Exutório, com os valores iguais a zero. Isso se dá porque as UHEs são os únicos usos, logo, para qualquer local a montante de Batalha que recebesse uma unidade adicional de água, essa unidade teria o mesmo valor, visto que o destino da mesma seria a UHE Batalha.

No arranjo econômico há um agrupamento em degraus, porém, em alguns meses algumas curvas - notadamente as dos nós de cabeceira - se deslocam para valores mais altos. Esses picos se referem aos locais e meses onde há escassez nos nós de culturas irrigadas. Na curva de permanência de valores médios é possível observar onde a água é mais escassa (i.e., possui valor marginal mais alto), em uma ordem que segue decrescente, de montante para jusante: no Nó 1 - Rio Samambaia, os valores são mais altos, e decrescem conforme se desloca para jusante em direção ao Nó 9 - Exutório.

Estes valores indicam os potenciais de geração de benefício econômico dos dois usos da água na bacia. Enquanto os valores marginais para a geração de energia hidrelétrica - no arranjo energético - atingem valores máximos da ordem de R\$ 0,10/m³, e médios de R\$ 0,04/m³ a R\$ 0,08/m³ no arranjo de alocação econômica, os valores para o uso na agricultura irrigada chegam a R\$ 0,30/m³, máximos 3 vezes maiores, e valores médios que vão de R\$ 0,04/m³ a R\$ 0,11/m³.

No Quadro 3.12 estão apresentados os valores médios de valor marginal.

Quadro 3.12 - Valores marginais médios

Nó	Valor marginal médio da água (R\$/1.000m ³)			
	Arranjo econômico		Arranjo energético	
	90% (mais seco)	10% (mais úmido)	90% (mais seco)	10% (mais úmido)
1 - Rio Samambaia	70,0	103,7	52,3	71,7
2 - São Marcos Cabeceira	57,5	77,9	52,3	71,7
3 - Confluência	57,5	76,5	52,3	71,7
4 - Mundo Novo	57,5	76,5	52,3	71,7
5 - Contribuição Batalha	57,5	76,5	52,3	71,7
6 - Batalha	57,5	76,5	52,3	71,7
7 - Contribuição Serra do Facão	44,0	57,8	39,4	53,7
8 - Serra do Facão	44,0	57,8	39,4	53,7
9 - Exutório	0,0	0,0	0,0	0,0
10 - Consumo Batalha	62,0	83,4	52,3	71,7
11 - Consumo Serra do Facão	45,2	63,0	39,4	53,7
12 - Irrigação Minas Gerais	57,5	76,5	52,3	71,7

Os nós de cabeceira têm um comportamento interessante, pois é onde há menor disponibilidade, dadas as menores áreas de drenagem, e conseqüentemente maior escassez, o que aumenta o valor marginal da água. Aliado a isso, seria mais eficiente, economicamente, concentrar os usos agrícolas irrigados a jusante das UHEs, para agregar ao valor da água consumida a geração de benefício advinda do uso gerado nas turbinas.

Apesar dessas motivações, as cabeceiras das bacias são justamente onde se concentram a maior parte dos pivôs centrais de irrigação.

3.3.1.3.2. Benefícios econômicos totais

Até então foram analisadas as alterações na energia gerada e na agricultura irrigada, porém a análise completa do *trade-off* envolve também quais os ganhos para o setor da agricultura irrigada e para o sistema como um todo. A última variável é a geração total de benefícios no sistema como um todo, oriundos da geração de energia e da agricultura irrigada conjuntamente. Na Figura 3.23 estão apresentados os benefícios gerados a cada mês, para os dois cenários de permanência e os dois arranjos de alocação.

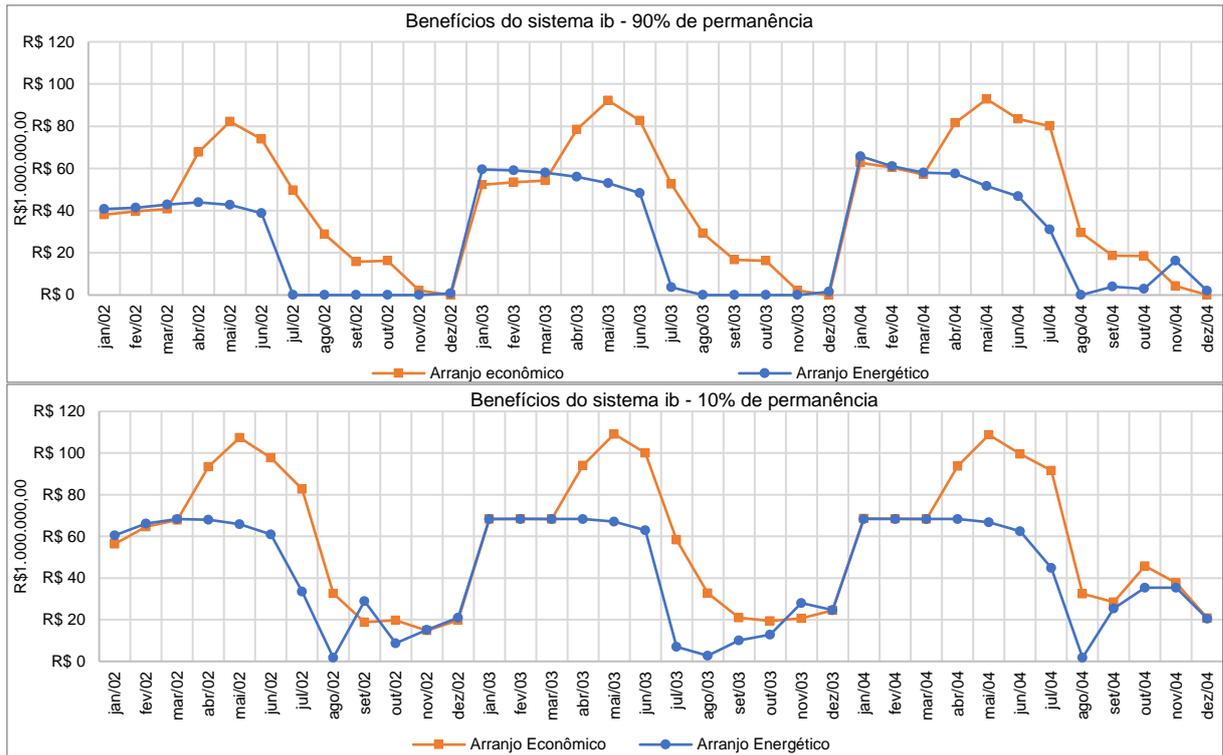


Figura 3.23 - Benefícios mensais médios no sistema nos dois arranjos e dois cenários de permanência

A diferença dos valores máximos mensais entre os diferentes arranjos dá um indicativo do efeito da agricultura irrigada no sistema. Os picos de geração de benefício se referem aos meses de maior atividade agrícola e geração de energia, enquanto os vales - notadamente onde o benefício é zero, ou próximo de zero - são referentes aos meses onde quase não há atividade agrícola irrigada (dezembro a março), e os preços da energia são menores, e a operação do sistema privilegia o armazenamento em detrimento da geração. Estes vales são menores e menos baixos nos anos mais úmidos (10% de permanência), devido à maior disponibilidade de água, da mesma forma que os picos são mais frequentes e mais altos, e conseqüentemente o valor de benefício total é maior.

Em alguns meses (janeiro a março) o benefício do arranjo energético supera o econômico. Esses são meses de chuva na região, onde a demanda de água dos mananciais superficiais é baixa se comparada com o resto do ano (Quadro 3.3).

A variação é cíclica ao longo dos três anos graças à natureza da variabilidade hidrológica, calendário agrícola e preços da energia, que também se comportam ciclicamente. Os ciclos não são idênticos, no entanto, devido à variabilidade hidrológica, que tende a valores cíclicos sazonais, mas não se comporta da mesma maneira em todo o ciclo, e devido às variações de disponibilidade geradas a jusante de Batalha, influenciada pela operação e armazenamento do reservatório.

Na Figura 3.24 estão apresentadas as curvas de permanência para os benefícios totais anuais médios gerados no sistema.

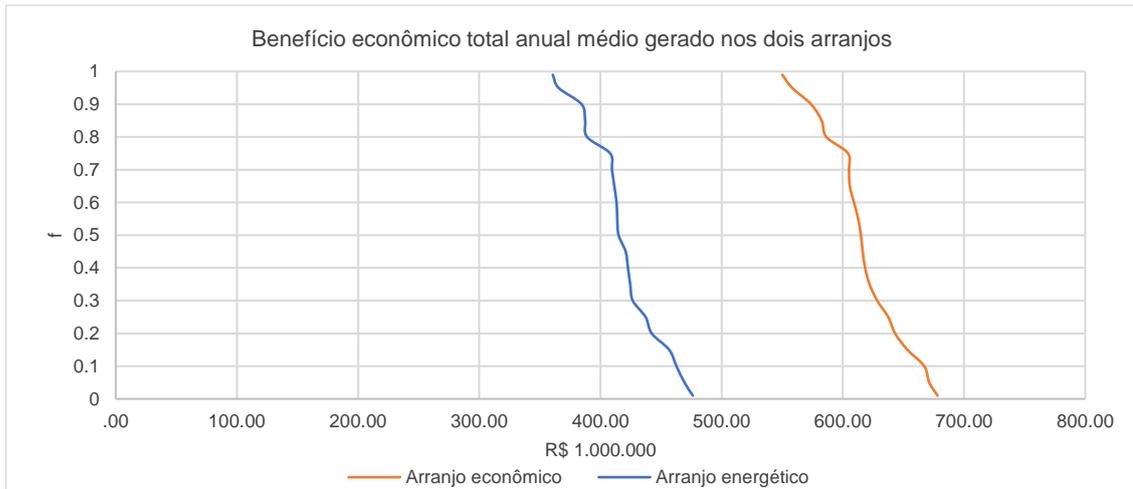


Figura 3.24 - Curva de permanência dos benefícios totais anuais médios no sistema

No Quadro 3.13 estão apresentados os benefícios totais para os cenários de 90% e 10% de permanência, para os dois arranjos de alocação, e as variações entre os arranjos.

Quadro 3.13 - Benefícios totais e gerados no sistema nos dois cenários de permanência e dois arranjos de alocação

Arranjo	Cenário		Benefício gerado (R\$)		
			Agricultura irrigada	Geração de energia ¹⁵	Total
Econômico	90% (mais seco)		R\$220,78	R\$353,01	R\$573,79
	10% (mais úmido)		R\$224,31	R\$442,84	R\$667,16
Energético	90% (mais seco)		-	R\$384,45	R\$384,45
	10% (mais úmido)		-	R\$462,70	R\$462,70
Variação	90%	Absoluto	R\$220,78	-R\$ 31,43	R\$ 189,34
		%	-	-8,18%	49,25%
	10%	Absoluto	R\$224,31	-R\$ 19,86	R\$ 204,45
		%	-	-4,29%	44,19%

Considerando o cenário mais seco (90% de probabilidade de excedência) a alocação de água para a agricultura irrigada gera um benefício de R\$220,78 milhões/ano. Em contrapartida, essa alocação produz como *trade-off* uma redução na geração de energia na bacia, resultando em uma perda de benefícios de R\$31,44 milhões/ano em energia não gerada. O resultado final é um saldo positivo de R\$189,34 milhões/ano, podendo chegar a R\$ 204,46 milhões/ano nos anos mais úmidos (10% de permanência).

No Quadro 3.9 são comparados os *trade-offs* dos benefícios gerados pelo setor hidrelétrico nos dois arranjos de alocação, apresentando a redução de benefícios das UHEs entre o arranjo energético e o econômico. No Quadro 3.14 é apresentado um resumo dos valores dos benefícios econômicos

¹⁵ O benefício gerado pela geração de energia apresentado aqui é sutilmente diferente do apresentado no item 3.3.1.1.1. Geração de energia, com diferenças que vão de 0,3% a 0,7% nos valores totais. Isso se dá porque o modelo não calcula diretamente o benefício gerado pela energia, e esse cálculo foi realizado fora do modelo, utilizando a potência gerada mensal multiplicada pelo valor da energia naquele mês. Aqui está apresentado o valor obtido através da diferença entre o benefício total e o benefício agrícola, e resulta nessa diferença de menos de 1%, oriunda da natureza estocástica do modelo, que gera resultados estatísticos e não pontuais. Nesse caso, o percentil 10 e percentil 90 utilizados para obter o benefício total e agrícola, variaram sutilmente daquele utilizado para obter as potências médias mensais, resultando nessa diferença de valor.

apresentados para agricultura irrigada, geração de energia e para o sistema como um todo, bem como os *trade-offs* resultantes dos diferentes arranjos de alocação.

Quadro 3.14 - *Trade-offs* dos benefícios gerados

Origem dos benefícios econômicos	Cenário	Benefícios gerados (R\$/ano)
Gerados pela agricultura irrigada	90% (mais seco)	R\$ 220.780.472
	10% (mais úmido)	R\$ 224.318.432
Energia sem a presença da agricultura	90% (mais seco)	R\$ 384.453.152
	10% (mais úmido)	R\$ 462.703.506
Energia com a presença da agricultura	90% (mais seco)	R\$ 354.046.042
	10% (mais úmido)	R\$ 445.425.231
Perda de benefícios energéticos pela presença da agricultura	90% (mais seco)	-R\$ 30.407.110
	10% (mais úmido)	-R\$ 17.278.275
Ganho de benefícios agrícolas pela presença da agricultura (saldo)	90% (mais seco)	R\$ 190.373.362
	10% (mais úmido)	R\$ 207.040.157
Benefícios totais com a presença da agricultura	90% (mais seco)	R\$ 573.796.747
	10% (mais úmido)	R\$ 667.161.939

Cabe destacar que a geração de energia traz também outros benefícios não aqui quantificados, envolvendo contribuição para redução do preço da energia em todo o SIN e outros benefícios advindos da segurança energética, além das outras unidades geradoras de energia hidrelétrica que se encontram ao longo dos rios que recebem água do rio São Marcos (indo até Itaipu, no rio Paraná). Por outro lado, o setor da agricultura irrigada também apresenta outros benefícios resultantes de efeitos multiplicadores de renda e emprego em toda a sua cadeia produtiva, como apresentado em Takasago; Cunha; Olivier (2017), cujo trabalho aponta para multiplicador de renda total de R\$ 612.199 por variação da demanda final de 1 milhão de reais e multiplicador de emprego total de 60,36 empregos por variação da demanda final de 1 milhão de reais. O objetivo aqui foi realizar uma análise considerando os limites regionais locais, definidos pela bacia hidrográfica do rio São Marcos.

3.3.2. *Validação dos resultados*

Uma etapa relevante para a validação dos dados envolve a verificação do quanto os resultados gerados pelo modelo representam a realidade. Considerando que os modelos de otimização requerem diversas simplificações, onde é necessário escolher quais as variáveis serão representadas, e quais serão deixadas de lado, é importante averiguar se os resultados são compatíveis com a ordem de grandeza do sistema real.

Essa verificação será realizada para os dois componentes principais do sistema São Marcos: a geração de energia hidrelétrica e a agricultura irrigada.

Para o primeiro, os resultados gerados serão comparados com dados observados nas UHEs Batalha e Serra do Facão, disponíveis no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), comparados com os dados de energia gerada nos reservatórios.

Para a agricultura irrigada, foram obtidos dados do Valor Adicionado Bruto (VAB) da agropecuária, correspondendo ao PIB Agropecuário de cada município que faz parte da bacia do Rio

São Marcos, e comparados com os benefícios econômicos gerados, oriundos da agricultura irrigada.

3.3.2.1. Consistência dos dados de geração de energia hidrelétrica

A Usina Hidrelétrica de Serra do Facão possui registro de vazão natural e incremental afluentes desde 01/01/2000. Em 01/01/2009 começam registros de afluência e defluência do reservatório, e em 19/11/2009 de cota a vazão vertida, com registros negativos de volume útil surgindo em 01/01/2010, o que denota o enchimento do reservatório durante esse período. Registros de vazão turbinada, e consequentemente de geração de energia, passam a ser observados a partir de 01/07/2010, até 16/10/2017.

A Usina Hidrelétrica de Batalha possui menor disponibilidade de dados, com os primeiros registros observados (de todas as variáveis) em 28/10/2014, até 26/10/2017. Isso gera aproximadamente oito anos de dados para a UHE Serra do Facão, e quatro anos de dados para a UHE Batalha.

Os dados diários de vazão turbinada foram convertidos em energia gerada através da relação de produtividade unitária de energia das duas hidrelétricas. Os valores de produtividade são de 0,38 MW/m³/s para a UHE Batalha e 0,72 MW/m³/s para a UHE Serra do Facão. Isso é uma aproximação, visto que a produtividade varia conforme a coluna d'água da turbina até o nível d'água do lago do reservatório. A partir disso, as vazões turbinadas diárias foram convertidas em energia gerada e agrupadas anualmente.

Os valores médios anuais foram calculados, assim como os percentuais de potência gerada em relação à instalada, e a energia média gerada a partir da potência, para ambas as UHE's, apresentados no Quadro 3.15.

Quadro 3.15 – Potência média mensal observada gerada na UHE Batalha

Ano	UHE Batalha			UHE Serra do Facão		
	P _{méd} (MW)	P _{méd} /P _{Inst}	E _{gerada} (GWh)	P _{méd} (MW)	P _{méd} /P _{Inst}	E _{gerada} (GWh)
2010	-	-	-	48,25	22,97%	422,64
2011	-	-	-	96,84	46,11%	848,32
2012	-	-	-	139,67	66,51%	1.223,54
2013	-	-	-	67,58	32,18%	592,03
2014	29,94	49,91%	262,31	119,61	56,96%	1.047,78
2015	24,75	41,25%	216,79	69,85	33,26%	611,91
2016	14,17	23,62%	124,15	54,77	26,08%	479,77
2017	14,82	24,71%	129,85	29,82	14,20%	261,21
<i>Média</i>	<i>20,92</i>	<i>34,87%</i>	<i>183,27</i>	<i>78,3</i>	<i>37,29%</i>	<i>685,9</i>

Como já mencionado, o modelo hidroeconômico executa cinco anos de operação do sistema São Marcos, dos quais o primeiro e o último foram removidos para evitar as interferências das condições inicial e final¹⁶. Os valores de energia gerada obtidos na rodada de otimização do arranjo

¹⁶ Os anos restantes são definidos como Ano 2, Ano 3 e Ano 4, porém, não devem ser confundidos com os anos de 2002, 2003 e 2004, dada pela notação "/02" apresentada nas tabelas e gráficos.

econômico foram calculados para os três anos restantes (excluindo-se o primeiro e o último da série de cinco), para 90% e 10% de permanência no tempo, apresentados no Quadro 3.16.

Quadro 3.16 – Valores anuais médios de energia produzidos pelo modelo no arranjo energético, em 50% do tempo

Ano	90%	10%	90%	10%
	E _{gerada} em Batalha (GWh)		E _{gerada} em Serra do Facão (GWh)	
Ano 2	121,38	245,61	525,38	926,61
Ano 3	184,36	263,91	701,26	1.047,03
Ano 4	195,88	287,67	850,75	1.245,95
Média	189,02	244,77	785,16	1.027,22

Na UHE Batalha, os valores médios reais observados foram de 189,02 GWh/ano para os quatro anos de dados observados (2014-2017). Destaca-se que é um período de vazões reduzidas em várias regiões do SE, SW e NE Brasileiro, portanto é um valor enviesado. Já o modelo de otimização resultou em 189,02 GWh/ano considerando-se 90% de permanência (mais seco), e 244,77 GWh/ano, considerando-se 10% de permanência (mais úmido). Para a UHE Serra do Facão, os valores médios observados foram de 685,90 GWh/ano para os oito anos de dados observados (2010-2017). Já o modelo de otimização resultou em 785,16 GWh/ano considerando-se 90% de permanência (mais seco), e 1.027,22 GWh/ano, considerando 10% de permanência (mais úmido).

Nota-se que os valores são próximos, indicando que os resultados do modelo são capazes de representar a realidade de geração energética na bacia. É esperado que o valor produzido pelo modelo seja contudo um pouco maior, principalmente para o cenário de menor permanência - isto é, mais adequado - uma vez que emprega séries temporais mais longas (sem o viés de uma série curta em período de vazões reduzidas) e também porque o modelo otimiza a geração sem considerar outras restrições operativas e objetivos presentes no SIN. Para a operação do reservatório na realidade, no entanto, outras variáveis influenciam na decisão, como a necessidade de fornecimento mínimo de energia para o sistema, mesmo em meses onde o reservatório está deplecionado ou o valor da energia é mais baixo. Isso gera reduções no montante total de energia gerado ao longo de um período maior, visto que as decisões operacionais não são necessariamente voltadas para a maximização do benefício econômico. Um exemplo disso é que em alguns meses - onde o preço da energia é menor - a operação simulada não gera energia, para armazenar mais água para os meses onde o preço da energia é maior, otimizando a geração de benefício econômico. Isso não tem contrapartida na realidade, pois seria necessário que uma turbina ficasse ociosa durante um mês inteiro, uma decisão operacional inviável devido a restrições contratuais.

Dentre os cinco anos simulados, aquele que possui menos interferência das condições de contorno é o ano 3, porém, optou-se por apresentar também o 2 e o 4 para uma maior disponibilidade de dados para comparação.

3.3.2.2. **Consistência dos dados do benefício econômico gerado nas usinas hidrelétricas**

Na Nota Técnica nº 103/GEREG/SOF-ANA (ANA, 2010a), é realizada uma análise do valor econômico dos usos da água na bacia do São Marcos, e é obtido um valor de R\$ 0,13/m³ para o valor unitário médio da água na cascata de usinas hidrelétricas da UHE Batalha, até a UHE Itaipu, através

de uma análise da rentabilidade média das proprietárias das usinas. Este cálculo chega a um valor total de R\$ 809,63/MWh, na cascata de usinas.

Os valores utilizados como dados de entrada foram retirados dos PLDs, e já representam o preço da energia na margem, e não o valor da energia firme comercializado ao preço definido nos leilões. No Quadro 3.23, disponível no Anexo 3.III, estão apresentados os valores utilizados, que variam de R\$ 139,6/MWh a R\$ 388,5/MWh para cada usina, o que totaliza um valor, na cascata Batalha-Serra do Fação de R\$ 279,2/MWh a R\$ 777/MWh, coerentes com os considerados na Nota Técnica da ANA. O valor unitário médio também está coerente com os valores marginais obtidos no arranjo energético.

3.3.2.3. *Consistência dos dados de benefícios econômicos gerados pela agricultura irrigada*

Para realizar o processo de consistência dos resultados obtidos da alocação de água na agricultura irrigada, foram analisados os Valores Adicionados Brutos (VABs) agropecuários municipais, isto é, as parcelas do PIB de cada município oriundos da agropecuária.

Os VABs são calculados a partir do excedente da produção gerado no setor, isto é, da diferença entre o valor da produção e o valor do consumo intermédio, resultando nos benefícios gerados pelo setor, reduzidos os custos de produção, ou, benefícios líquidos.

Os valores obtidos foram adquiridos no SIDRA (IBGE, 2014) para o ano de 2014, e ponderados para a área da bacia conforme o percentual da área de cada município que se encontra dentro da bacia do Rio São Marcos. Essa ponderação é baseada no pressuposto da igual distribuição da agricultura irrigada na área municipal. Os valores municipais do VAB agropecuário e os ponderados estão apresentados no Quadro 3.17.

Quadro 3.17 - VAB agropecuário municipal e parcela considerada dentro da BHSM

Município/DF	VAB Agropecuário municipal (R\$ Milhões/ano)	Percentual do município na bacia	VAB ponderado (R\$ milhões/ano)
Brasília (DF)	R\$ 770,07	1,01%	R\$ 7,77
Campo Alegre de Goiás (GO)	R\$ 206,84	60,76%	R\$ 125,67
Catalão (GO)	R\$ 318,28	47,36%	R\$ 150,74
Cristalina (GO)	R\$ 673,75	72,47%	R\$ 488,30
Davinópolis (GO)	R\$ 16,93	58,25%	R\$ 9,86
Guarda-Mor (MG)	R\$ 162,26	9,55%	R\$ 15,49
Ipameri (GO)	R\$ 306,64	10,26%	R\$ 31,48
Ouvidor (GO)	R\$ 17,81	51,49%	R\$ 9,17
Paracatu (MG)	R\$ 357,14	23,18%	R\$ 82,77
Unai (MG)	R\$ 521,39	15,19%	R\$ 79,20
Total	R\$ 3.351,10	-	R\$ 1.000,45

Fonte: IBGE (2014)

Os benefícios econômicos gerados pela agricultura irrigada na rodada de otimização do sistema São Marcos estão apresentados no Quadro 3.18.

Quadro 3.18 - Benefício econômico anual médio gerado pela agricultura irrigada

	Benefício econômico gerado pela agricultura irrigada (R\$)	
	90% de permanência	10% de permanência
Total	R\$ 220.780.472	R\$ 224.318.432

Os valores observados de geração de benefício econômico agropecuário foram de aproximadamente R\$ 1 bilhão/ano, enquanto que o benefício anual médio resultante na rodada de otimização, com 90% de permanência, foi de R\$ 220.780.472 e com 10% de permanência, de R\$ 224.318.432.

O VAB Agropecuário corresponde à geração de valor econômico de toda a atividade econômica agropecuária na região, incluindo agricultura irrigada em geral - não apenas por pivô central - agricultura não irrigada e pecuária. Isso inclui mais atividades com geração de benefício econômico além das consideradas na rodada de otimização. A metodologia de ponderação pela área também pode ser responsável pela diferença entre os resultados simulados e o VAB. Ainda assim, considera-se que a ordem de grandeza dos resultados está adequada, em relação ao observado.

Finalmente, na Nota Técnica nº 103/GEREG/SOF-ANA (ANA, 2010a) analisou os valores da água para agricultura irrigada, obtendo valores que vão até R\$ 0,35/m³, o que também mostra coerência com os valores obtidos na rodada de otimização.

3.3.3. Análise dos resultados

A partir das informações obtidas através do uso do modelo hidroeconômico, constata-se inicialmente que o montante global de benefícios gerados pelos dois setores na bacia são da ordem de R\$ 350 a R\$ 700 milhões anuais, sendo um pouco maior na geração de energia hidrelétrica, que em condições hídricas favoráveis (10% de permanência) chega a produzir R\$ 443 milhões/ano, o que equivale a 66% da geração de benefício econômico na bacia. A geração de benefício na agricultura contribui com um total de R\$ 224,3 milhões/ano, nas condições mais favoráveis, que equivale a aproximadamente 33% do benefício total.

A alocação da água para a agricultura irrigada na bacia produz *trade-offs* para a produção de energia da ordem de R\$ 19 a R\$ 31 milhões anuais, dependendo das condições hidrológicas, porém, traz ao sistema valores de mais de R\$ 200 milhões anuais.

Caso sejam comparadas as gerações de benefício econômico unitárias globais, isto é, R\$/m³ médios gerados nos diferentes usos, há valores máximos para irrigação de R\$ 0,466/m³ a R\$ 0,489/m³ nos cenários mais seco e mais úmido, respectivamente. Para a geração de energia, os valores vão de R\$ 0,038/m³ a R\$ 0,039/m³ para a UHE Batalha, e R\$ 0,093/m³ a R\$ 0,096/m³ na UHE Serra do Facão, o que gera um valor unitário total, na cascata, de R\$ 0,127/m³ a R\$ 0,135/m³. Lembrando que o valor obtido pela ANA na sua análise foi de de R\$ 0,13/m³ para o valor unitário médio da água na cascata de usinas hidrelétricas da UHE Batalha, até a UHE Itaipu.

É importante ressaltar que uma comparação direta entre benefício gerado por unidade hídrica (R\$/m³) entre esses dois setores deve ser feita com ressalvas, visto que a demanda da agricultura faz um uso consuntivo da água, que deixa de estar disponível quantitativa e muitas vezes qualitativamente

para outros usuários, enquanto o impacto na disponibilidade causado pela geração de energia é mais relacionado ao armazenamento de água (embora haja perdas por evaporação, são pequenas em relação às vazões captadas para agricultura), e pode ser até considerado positivo, quando fornece para jusante um serviço de regularização de vazões. Caso a mesma demanda hídrica agrícola estivesse localizada nessa bacia a jusante dos usos hidrelétricos, a geração de benefícios seria (potencialmente) a mesma, sem os custos envolvidos ao outro setor.

3.4. Conclusões

Não se pretende, com os dados apresentados aqui, definir qual uso deve ser prioritário, até porque a análise hidroeconômica realizada leva em consideração uma série de fatores, mas deixa de fora outros aspectos relevantes da discussão como:

- Os benefícios de rede gerados ao longo dos cursos hídricos dos quais o rio São Marcos é tributário. A vazão envolvida na geração de energia em Batalha e Serra do Facão passa ainda por uma cascata de reservatórios até a Hidrelétrica de Itaipu, no Paraná, gerando energia em todas essas unidades. Ainda que a geração de energia dessa cascata não tenha sido considerada, o valor do PLD utilizado, que representa o preço da energia na margem, é semelhante ao valor total da energia firme considerado em toda a cascata;
- O Sistema Interligado Nacional (SIN) que possui uma rede de geração e distribuição de energia construída e operada de modo a depender de certas garantias de fornecimento de energia por parte das unidades geradores, através dos contratos de energia firme. Nesse caso, um déficit da energia firme produzida pode vir a causar efeitos maiores do que apenas o efeito na produção de benefício econômico de uma, ou duas, usinas individuais;
- A cadeia produtiva da geração de alimentos produzidos com a agricultura irrigada, que gera efeitos multiplicadores de emprego e renda, como apresentado em Takasago; Cunha; Olivier (2017);
- Os aspectos institucionais da alocação de água na bacia, envolvendo os direitos de uso, emissão de outorgas, a DRDH e circunstâncias contratuais das hidrelétricas com o ONS.

Feitas essas considerações, é importante e necessário o conhecimento do valor econômico da água e seus custos de oportunidade, de modo a aprofundar e embasar as discussões e progredir na busca pela solução dos conflitos de forma a produzir o melhor resultado possível.

Os resultados obtidos demonstram que, ao contrário do senso comum - que dita que a atividade agrícola é uma atividade tipicamente de baixo valor agregado, e a geração de energia envolve cifras muito mais altas - a atividade agrícola irrigada na bacia do São Marcos produz praticamente o mesmo valor global de benefício econômico, e comparando os *trade-off's* entre a alocação de unidades de água para o armazenamento ou uso na irrigação, o segundo gera um benefício de valor de 6 a 12 para 1, nas condições específicas de configuração e disponibilidade hídrica apresentadas neste trabalho.

Outro aspecto interessante a ser observado é em relação à magnitude dos valores de cobrança relacionados ao setor agrícola. Tipicamente os mecanismos de cobrança implantados nas bacias hidrográficas brasileiras isentam ou garantem pagamentos diferenciados para o setor agrícola, com

valores que dificilmente ultrapassam o centavo por metro cúbico, sob a justificativa de que é um setor com baixa geração de valor agregado, e que PPU's (Preços Públicos Unitários) mais altos inviabilizariam a atividade. No item 3.3.1.3.1, onde foram apresentados os valores marginais da água obtidos no sistema, foram identificados meses com escassez no setor agrícola, com o valor marginal atingindo valores de até R\$ 0,30/m³ em um mês específico, e em outros meses da ordem de R\$ 0,15/m³. Ou seja, valores da ordem de R\$ 0,10 não são necessariamente proibitivos para o funcionamento do setor, dadas as características apresentadas aqui. Faz-se a ressalva de que a bacia do São Marcos é tipicamente um polo de agricultura irrigada por pivô central, que é um método que envolve tecnologia e tende a ter produtividades mais elevadas que agricultura não irrigada, ou mesmo que de métodos alternativos de irrigação, como gotejamento ou aspersão convencional, logo, as informações não necessariamente se aplicam para qualquer empreendimento que utilize agricultura irrigada.

O ponto defendido é que o conhecimento e a informação adequada a respeito do valor econômico da água, seus custos e benefícios, e seus *trade-offs*, os processos nos quais se dá seu uso, enquanto bem, dotado de valor econômico, são importantes para evitar vieses gerados pelo senso comum, e equívocos na elaboração de políticas de gestão de recursos hídricos.

3.5. ANEXOS

Anexo 3.1 - Distribuição de áreas

Conforme mostrado na Figura 3.9 e no Quadro 3.5, os nós 1, 2, 10 e 12 representam áreas irrigadas na cabeceira do sistema, a montante da UHE Batalha. O nó 11 representa as áreas irrigadas a montante da UHE Serra do Facão e o nó 9 as áreas irrigadas no trecho final do sistema, a jusante de ambas as UHEs.

Áreas e percentuais dentro e fora da bacia estão apresentados no Quadro 3.19.

Quadro 3.19 - Distribuição da área da bacia nas Unidades da Federação e municípios

Município	Unidade da Federação	Sigla	Área		
			km ²	ha	%
Brasília	Distrito Federal	DF	49,93	4.993,00	0,41%
Total	Distrito Federal	DF	49,93	4.993,00	0,41%
Campo Alegre de Goiás	Goiás	GO	1.498,53	149.853,00	12,40%
Catalão	Goiás	GO	1.791,21	179.121,00	14,82%
Cristalina	Goiás	GO	4.469,50	446.950,00	36,97%
Davinópolis	Goiás	GO	303,26	30.326,00	2,51%
Ipameri	Goiás	GO	449,26	44.926,00	3,72%
Ouvidor	Goiás	GO	213,34	21.334,00	1,76%
Total	Goiás	GO	8.725,11	872.511,00	72,17%
Guarda-Mor	Minas Gerais	MG	119,83	11.983,00	0,99%
Paracatu	Minas Gerais	MG	1.908,41	190.841,00	15,79%
Unai	Minas Gerais	MG	1.285,83	128.583,00	10,64%
Total	Minas Gerais	MG	3.314,08	331.408,00	27,41%
Total			12.089,12	1.208.912,00	100%

Fonte: IBGE (2000)

Área irrigada e número de pivôs centrais por municípios e por estado estão apresentados no Quadro 3.20.

Quadro 3.20 - Área irrigada e número de pivôs centrais por município e por Unidades da Federação na Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos

Município/DF	Unidade da Federação	Área irrigada		Número de pivôs centrais	
		ha	%	nº	%
Brasília	Distrito Federal	935,94	0,97%	13	1,15%
-	Distrito Federal	935,94	0,97%	13	1,15%
Campo Alegre De Goiás	Goiás	4.545,75	4,69%	60	5,30%
Catalão	Goiás	3.389,44	3,50%	34	3,00%
Cristalina	Goiás	43.186,01	44,58%	519	45,85%
Ipameri	Goiás	2.181,59	2,25%	22	1,94%
-	Goiás	53.302,78	55,02%	635	56,10%
Guarda-Mor	Minas Gerais	1.604,40	1,66%	33	2,92%
Paracatu	Minas Gerais	12.026,78	12,41%	140	12,37%
Unaí	Minas Gerais	29.003,90	29,94%	311	27,47%
-	Minas Gerais	42.635,08	44,01%	484	42,76%
Total		96.873,79	100%	1.132	100%

Anexo 3.II - Funções de otimização do algoritmo de distribuição espaço-temporal das culturas irrigadas

Foi elaborado um algoritmo de otimização, visando preencher a área disponível durante o máximo de tempo possível do ano, considerando a unidade temporal como o mês, e a unidade espacial como 5% da área disponível, gerando 240 unidades de área*mês. A função objetivo maximiza a área ocupada, sujeito a restrições que representam as características das informações retiradas do SIDRA e do caráter histórico das culturas da região, descritas nos parágrafos anteriores. O algoritmo foi executado no *solver* do *software* Microsoft Excel, considerando o pressuposto de que os irrigantes sempre tentarão maximizar sua área plantada, de forma a não ficar com pivôs ociosos, dado seu alto custo de implantação e manutenção. Seguem as funções de otimização:

Funções de restrição:

$$A_1^m \geq 0,5, \quad \text{para } m = 1, 2, 3, 4 \quad (3.10)$$

$$A_2^m \geq 0,25, \quad \text{para } m = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (3.11)$$

$$A_3^m \geq 0,1, \quad \text{para } m = 5, 6, 7, 8, 9, 10 \quad (3.12)$$

$$A_4^m \geq 0,05, \quad \text{para } m = 6, 7, 8, 9, 10, 11 \quad (3.13)$$

$$A_5^m \geq 0,1, \quad \text{para } m = 1, 2, 3, 4 \quad (3.14)$$

$$A_6^m \geq 0,05, \quad \text{para } m = 1 \text{ a } 12 \quad (3.15)$$

$$A_7^m \geq 0,05, \quad \text{para } m = 7, 8, 9, 10 \quad (3.16)$$

$$A_T^m = \sum_{i=1}^8 A_i \leq 1 \quad \text{para todo } m \quad (3.17)$$

Função objetivo:

$$\max \sum_{m=1}^{12} A_T^m \quad (3.18)$$

Onde,

m é o mês, contado a partir de outubro ($m = \text{out} = 1, \text{nov} = 2, \text{dez} = 3, \text{jan} = 4, \dots, \text{set} = 12$)

i é a cultura ($i = 1 =$ Soja, $2 =$ Milho, $3 =$ Milho 2ª safra, $4 =$ Alho, $5 =$ Feijão, $6 =$ Café, $7 =$ Batata)

Anexo 3.III - Dados de entrada do modelo detalhados

Os quadros a seguir apresentam em detalhe os dados de entrada do modelo.

Quadro 3.21 - Informações técnicas e operacionais das UHEs da bacia

Dados		UHE Batalha	UHE Serra do Facão
Dados energéticos	Potência nominal (MW)	60	210
	Energia firme (MW)	48,8	182,4
	Rendimento (%)	90,60%	90,60%
Volume Reservatório (hm³)	Máx	1.781	5.199
	Mín	430	1.752
Turbina	Queda de referência (m)	37,7	78,3
	Vazão máxima (m³/s)	152,4	291,66

Para o cálculo da vazão turbinada, informação não disponível no SIPOT, foi utilizada a Equação (3.19). Cabe ressaltar que essa vazão representa a vazão máxima turbinada, necessária para atingir a potência instalada de geração.

$$P_{ins} = \frac{H * \gamma * Q * \eta}{1000} \quad (3.19)$$

Onde,

P_{ins} é a potência nominal da turbina [MW]

H é a queda de referência [m]

γ é o peso específico da água [N/m³]

Q é a vazão turbinada [m³/s]

η é o rendimento do sistema turbina-gerador [-]

As curvas de cota-área-volume, também obtidas do SIPOT, estão apresentadas no Quadro 3.22.

Quadro 3.22 - Curvas Cota-Área-Volume das UHEs em operação

Usinas	Cota (m)	Área (km²)	Volume (hm³)
UHE Batalha	42,70	177,10	2.569,52
	37,70	138,13	1.781,61
	32,70	103,50	1.177,52
	27,70	72,88	736,55
UHE Serra do Facão	79,27	232,37	5.411,07
	78,33	218,84	5.199,00
	54,83	94,54	1.725,00

O preço da energia utilizado está apresentado no Quadro 3.23, e foi considerado como o preço de liquidação das diferenças (PLD) do SIN (CCEE, 2017), que reflete o custo marginal de operação (CMO) de todo o sistema interligado nacional (SIN). Em outras palavras, é o custo de se produzir uma unidade adicional de energia (MWh) em todo o SIN.

Quadro 3.23 - Preço mensal da energia

Mês	Preço da energia (R\$/MWh)
Jan	388,5
Fev	388,5
Mar	388,5
Abr	388,5
Mai	387,0
Jun	380,2
Jul	276,0
Ago	133,4
Set	240,3
Out	218,8
Nov	222,5
Dez	139,6

As informações econômicas utilizadas para as culturas irrigadas estão apresentadas no Quadro 3.24.

Quadro 3.24 - Dados econômicos e operacionais das culturas irrigadas

Cultura	Produtividade e (T/ha)	Preço (R\$/T)	Custos operacionais (R\$/ha)	Lucro bruto (R\$/ha)	Lucro líquido (R\$/ha)	Eficiência de irrigação	Eficiência de retorno
Soja	4,2	1.050,00	3.690,07	4.410,00	719,93	0,80	0,30
Milho	9,0	500,00	4.316,33	4.500,00	183,67	0,80	0,30
Alho	12,0	6.000,00	61.865,00	72.000,00	10.135,00	0,80	0,30
Feijao	3,0	2.200,00	5.653,19	6.600,00	946,81	0,80	0,30
Cafe	3,3	7.166,67	11.677,91	23.650,00	11.972,09	0,80	0,30
Batata	25,0	1.588,00	30.093,00	39.700,00	9.607,00	0,80	0,30

Os dados de entrada de demanda hídrica para irrigação são incluídos no modelo em unidades de vazão específica, em m³/ha. O modelo para preenchimento da distribuição espaço-temporal do plantio de culturas irrigadas, descrito no item 3.2.1.2.1. Agricultura irrigada, considera a variação mensal de alocação de área das culturas, arranjo típico da irrigação por pivô central. O modelo hidroeconômico, no entanto, considera a irrigação como estática no sistema, e isso exige uma adequação das informações de área discretizadas mensalmente, obtidas no modelo de distribuição espaço-temporal, para informações de área estáticas, a serem incluídas no modelo PDDE.

Isso foi feito obtendo as proporções das unidades de área*mês (96.874 ha*12 meses), de cada cultura, cujo total é de 1.162.485,53 ha.mês, para todo o ano agrícola. As proporções dessa distribuição são aplicadas aos 96.874 hectares irrigados para obter a área irrigada, estática, de cada cultura. As proporções e as áreas estão apresentadas no Quadro 3.25.

Quadro 3.25 - Distribuição das culturas nas unidades de área*mês

Cultura	Percentual de área*mês durante o ano (-)	Área irrigada estática da cultura (ha)
Soja	21,43%	20.758,67
Milho	18,75%	18.163,84
Alho	2,68%	2.594,83
Feijão	42,86%	41.517,34
Café	5,36%	5.189,67
Batata	8,93%	8.649,45
Total	100,00%	96.873,79

A partir dessa distribuição, foi realizado um cruzamento em ambiente SIG entre as proporções de cada cultura em cada município da bacia, conforme o SIDRA (IBGE, 2014), e os nós da bacia, com as proporções de cada município em cada nó, o que resulta na distribuição das áreas estáticas das culturas em cada nó da bacia. Essa distribuição está apresentada no Quadro 3.26.

Quadro 3.26 - Distribuição das áreas irrigadas estáticas, por nó, por cultura, no sistema São Marcos

Nó de irrigação	Cultura	Área irrigada (ha)	Nó de irrigação	Cultura	Área irrigada (ha)
1	Soja	2.780,27	1	Feijão	7.655,00
2	Soja	1.242,17	2	Feijão	3.839,38
12	Soja	4.066,58	12	Feijão	13.342,08
10	Soja	3.640,88	10	Feijão	8.600,72
11	Soja	7.580,54	11	Feijão	7.636,49
9	Soja	1.448,24	9	Feijão	443,67
1	Milho	4.700,13	1	Café	412,24
2	Milho	1.089,12	2	Café	610,13
12	Milho	3.536,20	12	Café	2.179,36
10	Milho	3.705,43	10	Café	513,83
11	Milho	4.580,29	11	Café	1.311,98
9	Milho	552,66	9	Café	162,13
1	Alho	644,52	1	Batata	1.368,16
2	Alho	164,83	2	Batata	635,06
12	Alho	429,72	12	Batata	1.655,69
10	Alho	760,56	10	Batata	2.930,35
11	Alho	579,84	11	Batata	2.060,18
9	Alho	15,37	9	Batata	0,00

Por fim, as demandas de evapotranspiração calculadas foram divididas pelas áreas irrigadas de cada cultura em cada mês, para obtenção das demandas em m³/ha.

O método utilizado para a alocação das culturas considerou a alocação no espaço disponível, durante os 12 meses do ano, para ser mais fidedigno à utilização real do sistema de irrigação por pivô central, com rotação de culturas. O modelo SDDP, no entanto, considera o espaço disponível como estático durante o ano inteiro (não é possível variar a área plantada de uma cultura ao longo dos meses). Como essa distribuição é desigual entre as áreas espaço-temporais (área*mês) e as áreas estáticas, iguais para todo o ano, isso geraria uma redução na demanda hídrica. Para evitar essa distorção, foi aplicado um fator de redução de 0,68 nas áreas*mês (equivalente à redução na demanda entre os dois métodos), o que garante a manutenção dos mesmos volumes totais de evapotranspiração para ambos os métodos. O resultado, incluído como dado de entrada no modelo PDDE, está apresentado no Quadro 3.27.

Quadro 3.27 - Demandas hídricas unitárias das culturas irrigadas

Cultura	Demandas de irrigação (m ³ /ha)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Soja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	731,44	127,94	0,00
Milho	261,25	29,00	0,00	0,00	465,50	587,00	731,25	0,00	0,00	807,75	203,50	0,00
Alho	0,00	0,00	0,00	503,75	942,50	7.595,00	9.131,25	10.566,25	0,00	0,00	0,00	0,00
Feijao	0,00	0,00	0,00	571,25	823,25	477,50	1.321,88	1.462,75	903,13	0,00	0,00	0,00
Cafe	0,00	0,00	0,00	436,25	882,88	970,25	1.190,63	1.309,75	977,19	349,88	0,00	0,00
Batata	0,00	0,00	0,00	706,25	1.121,38	751,25	928,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4. ARTIGO II - UMA PROPOSTA DE INSTRUMENTO DE ALOCAÇÃO NEGOCIADA DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO MARCOS BASEADA NO VALOR ECONOMICO DA ÁGUA

4.1. Introdução

A presença de rivalidade¹⁷ entre usos da água frequentemente resulta em conflitos quando o recurso é escasso devido à disponibilidade limitada, demandas abundantes ou ainda uma combinação de ambos. Até mesmo usos tradicionalmente considerados não consuntivos, como a geração hidrelétrica, podem apresentar características de rivalidade com outros usos consuntivos (ex: agricultura irrigada) quando a solução ideal para a geração hidrelétrica é privilegiar o armazenamento, no instante em que a solução ideal para a agricultura a jusante for a liberação de água. Nesse caso a rivalidade é causada pela temporalidade (*timing*) das demandas. Caso o armazenamento esteja localizado a jusante do uso agrícola, a rivalidade é causada pelo uso desse último.

Historicamente, conflitos foram evitados atacando a escassez do recurso com o emprego de soluções com foco na oferta hídrica (se existe água em abundância, a presença de usos rivais não trará problemas). Entretanto, na medida em que essas soluções se tornam cada vez mais caras e complexas e as demandas se tornam mais abundantes, pode ser economicamente mais vantajoso operar com algum nível de escassez. Jenkins et al. (2004) concluíram, em estudo envolvendo a otimização hidroeconômica no estado da Califórnia, não ser economicamente viável nem desejável eliminar completamente a escassez e seus custos no estado, considerando usos de abastecimento urbano, agricultura irrigada e indústria. Uma conclusão semelhante pode ser alcançada observando-se os diferentes usos da água em grandes regiões metropolitanas no Brasil e os custos crescentes em buscar água em mananciais cada vez mais distantes para atender às mesmas demandas hídricas. Adotar um nível de escassez nesse caso significa reconhecer que, para alguns usos (os menos nobres e de menor valor para a sociedade) é economicamente mais eficiente o seu não atendimento do que investir em infraestrutura para aumentar a disponibilidade.

A dificuldade nesse aspecto é identificar qual o nível de escassez que será aceitável e, especialmente, como distribuir a escassez entre os usos rivais. Para resolver essa questão é preciso decidir sobre a **alocação da água**, questão ainda não abordada de forma explícita pela gestão dos recursos hídricos no Brasil. O que vem sendo feito de modo geral no país é alocar a água a partir da ordem de chegada do solicitante e considerando apenas o critério de disponibilidade hídrica. Em situações de crise ou deflagração de conflitos, usuários são chamados a discutir soluções em um processo de negociação, referido como *alocação negociada*. É importante destacar que esse último se trata de um conceito diferente da **alocação** propriamente dita. A **alocação** deve ser capaz de produzir diretrizes para instrumentos como os planos de bacia e especialmente a *outorga*, enquanto que a

¹⁷ O uso de um recurso é considerado **rival** quando reduz a disponibilidade para os demais usuários. A palavra tem origem no Latim *rivalis*, que significa “pessoa que utiliza o mesmo curso d’água que outro”. Curiosamente, embora o termo se aplique à qualquer recurso, sua origem etimológica remete ao uso da água.

alocação negociada vem sendo aplicada em situações onde o conflito já existe ou é iminente, para sua resolução.

A ANA descreve a alocação negociada de água, como uma negociação realizada no âmbito dos comitês de bacia hidrográfica, que levanta as demandas e necessidades de cada usuário de água, e chega a um consenso sobre o rateio que deve ser feito entre esses usuários, para essa situação de conflito. A legislação garante a prioridade de uso para abastecimento humano e dessedentação de animais, mas fora esses dois usos prioritários, não há definição legal para os usos prioritários. Uma das críticas levantadas pela OCDE (2017), no entanto, é em relação à captura da decisão por um grupo influente que ocorre nos comitês de bacia, muitas vezes pautadas por discussões sem o devido embasamento técnico.

No Relatório de Conjuntura 2017, a ANA (2017a) elenca algumas das medidas para lidar com as crises, e coloca a alocação negociada em um patamar intermediário entre medidas de planejamento e medidas reativas (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Medidas para solução e mitigação de crises e conflitos pelo uso da água

Entretanto, percebe-se que falta a adoção do conceito mais amplo de alocação no processo de planejamento. Dinar, Rosegrant e Meinzen-Dick (1997) classificam os mecanismos de alocação de água em quatro tipos:

- **Precificação baseada no custo marginal** onde o preço da água é igual ao seu custo de oportunidade marginal. Tem a vantagem de atingir maiores níveis de eficiência econômica e evitar a subprecificação do recurso, e conseqüentemente a superexploração do mesmo, mas passam justamente pela dificuldade de se definir o valor marginal;
- **Alocação de água por uma instituição pública** onde a autoridade pública define a alocação, feita de modo a perseguir objetivos equitativos e de acesso igualitário. Tem a desvantagem de muitas vezes gerar desperdício e ineficiência na alocação;
- **Mercados de água** onde as instituições são formuladas para permitir a transação dos direitos, ou quotas dos direitos de água. Possuem como vantagem a alocação bastante

eficiente, em teoria, e como desvantagem a dificuldade em se medir e definir direitos sobre a água, além de possíveis dificuldades em identificar e mitigar externalidades resultantes da alocação mercadológica;

- **Alocação baseada nos usuários** onde a ação coletiva dos usuários e das instituições define, de forma participativa, como se dará a alocação. Tem como vantagem a flexibilidade de adaptação e o alto grau de aceitabilidade pública e política, e como desvantagem o risco de captura das decisões por grupos mobilizados de interesses.

No contexto brasileiro vigora uma mistura entre o segundo e o quarto exemplos, visto que todas as decisões devem passar pelos comitês de bacia, e dada a maneira como o sistema de recursos hídricos é configurado, qualquer alternativa ao nosso sistema de alocação deve passar necessariamente pelo quarto exemplo, combinado com mais algum outro. Apesar disso, mercados informais de água já foram relatados em estados como o Rio Grande do Sul entre produtores de arroz (RIBEIRO; LANNA, 2001) e no nordeste Brasileiro (MOTTA, 1998; ABREU, PINHEIRO, 2007; LOPES, FREITAS, 2007), e sua presença constitui um indicativo da percepção dos usuários sobre o valor econômico da água na alocação do recurso. Em 2017, foi submetido para discussão no senado brasileiro um Projeto de Lei (PL nº 495, de 2017, (BRASIL, 2017), com vistas a tornar mercados de água como instrumentos formais de gestão de recursos hídricos.

Lopes e Freitas (2007) discutem o sistema de alocação utilizado no Brasil, e levantam algumas fragilidades, como falta de informações a respeito dos usos da água nas bacias e sua evolução, o que dificulta a previsão de conflitos antes que eles ocorram. Além disso, mencionam que os critérios de outorga são muitas vezes definidos no âmbito do estado, e não consideram as particularidades regionais da oferta e demanda hídrica, o que resulta em sub-alocações ou sobre-alocações desnecessárias.

Os autores citam o exemplo da alocação negociada de água na bacia do Verde Grande, no Estado de Minas Gerais, onde a grande variabilidade hidrológica resulta em vazões de estiagem muito inferiores às dos períodos chuvosos. Isso motivou a construção de reservatórios ao longo do rio, a jusante dos quais começaram a surgir demandas hídricas utilizando a vazão regularizada, que acabaram por se tornar maiores do que a oferta. A emissão de outorgas foi encerrada e uma estratégia de análise dos cadastros e estabelecimento de regras adequadas para a emissão de novas outorgas foi feito. Encontros entre os usuários e o poder público ao fim dos períodos chuvosos são feitos para definição das regras de operação e alocação dos volumes de água disponíveis, processo repetido anualmente. São mencionadas, ainda, lacunas em relação a falta de previsibilidade dos resultados, associada ao curto alcance das regras anuais, que devem ser revistas anualmente.

No Estado do Espírito Santo, a crise hídrica ocorrida no biênio 2015-2016 motivou a criação de um Comitê Hídrico Governamental que estabeleceu diversas ações integradas para lidar com a crise no estado, incluindo suspensões de outorgas, recuperação de nascentes, construção de reservatórios, políticas de incentivo a reuso de água, e um Acordo Específico de Cooperação Comunitária, que focou em normas regulando o uso da água no ramo industrial, enquanto estivesse vigorando o estado de alerta (PEDROSA, 2017).

Amorim, Ribeiro e Braga (2016) mencionam o exemplo da bacia hidrográfica do Piranhas-Açú, cuja vazão foi dividida entre os Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, através da Resolução ANA nº 687/2007, o primeiro conflito solucionado através de um Marco Regulatório pela ANA, elaborado após diversas reuniões realizadas ao longo de dois anos, com os representantes do poder público dos dois Estados. Foram estabelecidos três grupos de trabalho e elaborados diversos estudos e atividades de regularização, monitoramento e fiscalização para chegar à partilha de vazões.

Oliveira (2014) propõe um mecanismo de alocação de água formado por uma combinação de dois mecanismos: formação de consenso e instrumento econômico. A proposta é composta por um sistema de prioridades de uso que utiliza a cobrança com base na garantia de longo prazo, e os recursos adquiridos com essa cobrança são utilizados para pagamentos de seguros e compensação financeira em anos secos, combinando critérios de eficiência econômica, legitimidade política, equidade, sustentação financeira e capacidade de adaptação. Segundo o autor, a proposta alcançou resultados satisfatórios.

O caso das Águas do Vale no Ceará também merece destaque, onde os agricultores foram compensados pela renúncia à área cultivada, combinado ao instrumento de cobrança para financiar parte das compensações (PEDROSA, 2017). O mesmo autor ainda menciona que o modelo de indenização é amplamente consolidado no estado americano da Califórnia, embora seja novo no contexto brasileiro.

Na linha de um dos tipos de alocação definidos por Dinar, Rosegrant e Meinzen-Dick (1997), Pulido-Velazquez, Alvarez-Mendiola e Andreu (2013) também apresentam um arcabouço para a definição de um mecanismo de alocação pelo uso da água a partir do custo marginal de oportunidade, argumentando, a partir de uma simulação utilizando um modelo determinístico para alocar a água de forma ótima, que a consideração do valor marginal é essencial para evitar erros significativos em investimentos e decisões de alocação de água nas bacias. Os autores utilizaram um modelo para simular a alocação atual de água em uma bacia a partir do sistema de gestão vigente, e compararam com uma segunda simulação otimizando a alocação de água na bacia a partir do valor marginal, para definir a perda de oportunidade de benefícios.

De forma semelhante, Macian-Sorribes; Pulido-Velazquez; Tilmant, (2014) propõem uma estrutura de cobrança pelo uso da água a partir de critérios de escassez, utilizando o custo de oportunidade marginal da água como critério para a valoração da água, e a definição dos preços a serem cobrados pelo recurso, de forma semelhante a Zhu; Van Ierland (2012) e Pulido-Velazquez; Alvarez-Mendiola; Andreu (2013), porém, utilizam um modelo de programação dinâmica estocástica, que utilizam o grau de incerteza da série histórica hidrológica para capturar e resumir as possibilidades de otimização da alocação dos recursos considerando a natureza estocástica do regime hidrológico, informação essencial ao considerar políticas de precificação considerando critérios de escassez.

Tilmant; Marques; Mohamed (2015) apresentam uma estrutura de contabilidade hídrica dinâmica baseada no custo de oportunidade marginal, também utilizando a PDDE, semelhante ao proposto neste trabalho.

De um modo geral, os trabalhos apresentados vêm empregando modelos hidroeconômicos para a determinação do valor marginal da água ou do seu custo marginal de oportunidade e de cenários de alocação econômica. Porém, existem ainda lacunas em como operacionalizar essa informação em um sistema onde determinados usos competitivos, e alocações, já se encontram em conflito. Quando questões sociais, políticas e de equidade são consideradas, o resultado é que apenas uma fração da água disponível poderia ser alocada economicamente.

Dessa forma, o presente artigo traz uma contribuição nova para a área de conhecimento ao combinar as informações de valor econômico da água variável no tempo, no espaço e em probabilidade com um sistema de contabilidade hídrica dinâmica para tornar operacional uma alocação negociada. Como resultado útil, essa contribuição deverá trazer para a negociação o componente econômico e os *trade-offs* de soluções diferentes de alocação da água, em consonância com os fundamentos da legislação atual sobre recursos no Brasil e no mundo.

Este artigo utiliza informações do valor econômico da água nos diferentes usos na bacia do São Marcos para exemplificar e lançar as bases conceituais de um instrumento econômico de alocação e resolução de conflitos pelo uso da água. Este instrumento deverá **(i)** Levar em consideração o valor econômico da água; **(ii)** Buscar internalizar as externalidades econômicas geradas no uso de recursos hídricos por um usuário a outros usuários; **(iii)** Incorporar um sistema de incentivos que estimule a racionalização e eficiência no uso de água e contribua para a viabilidade dos empreendimentos dependentes de recursos hídricos; **(iv)** Identificar soluções de alocação economicamente eficientes da água dentro da bacia; **(v)** Levar em consideração a variação na disponibilidade hídrica (e por conseguinte na escassez) no tempo e no espaço, bem como seus reflexos no valor marginal e custos de oportunidade da água na bacia.

Esse instrumento será denominado Alocação Negociada Hidro-Econômica (ALE) baseado em um procedimento de contabilidade hídrica dinâmica apresentado em Tilmant, Marques e Mohamed (2015). A sua aplicação irá requerer uma estrutura institucional e regulatória que permita aos usuários transacionar quotas de uso dos recursos hídricos em troca de compensações financeiras, ou pagar pelo uso dos recursos hídricos a partir do valor do recurso em um dado momento em um dado espaço. A quantidade de quotas passíveis de transação deverá ser definida em acordo envolvendo os comitês de bacias, os conselhos estaduais de recursos hídricos, o conselho nacional de recursos hídricos, a ANEEL e os órgãos gestores estaduais e federal (ANA). Um maior detalhamento institucional desse arranjo encontra-se fora do escopo do presente trabalho. Entretanto o modelo proposto e resultados deverão contribuir para aprimoramentos futuros.

Essa estrutura visa funcionar como um instrumento que venha a desenvolver o atual paradigma dos instrumentos econômicos de gestão no Brasil - como a cobrança pelo uso da água, e o mais recentemente proposto pelo PL nº 495, de 2017 (BRASIL, 2017), que visa instituir os mercados de água como instrumento de gestão - e que reflita o valor marginal da água e suas variações no espaço e no tempo, ao contrário de apenas um valor fixo e estático. O valor marginal do custo de oportunidade da água (PULIDO-VELAZQUEZ; ALVAREZ-MENDIOLA; ANDREU, 2013) é o indicador a ser utilizado para definir esse valor marginal e suas variações.

Com a estrutura da ALE (Alocação Negociada Hidroeconômica) pretende-se:

- (i) Identificar soluções de alocação que resultem em aumento do benefício total do sistema - bacia hidrográfica - através da alocação eficiente de água na bacia, conforme o valor marginal de oportunidade;
- (ii) Propor um sistema de informações para comunicar as soluções de alocação aos usuários e criar a possibilidade de realizar alocação negociada ao nível individual;
- (iii) Estruturá-lo de forma a não causar uma ruptura institucional muito grande que venha a lesar determinados usuários, em conformidade com os princípios de equilíbrio social, econômico e ambiental;
- (iv) Propor alternativas que estejam em conformidade com a atual legislação brasileira, que veta a compra e venda direta de outorgas, criação de mercados de água e mercantilização dos direitos de uso, logo, estruturar o mecanismo de forma a permitir as transações de maneira indireta;
- (v) Propor uma possível alternativa local ao atual instrumento de alocação negociada que tem sido utilizada no Brasil, operando através de um sistema de incentivos que torne interessante para os usuários, a nível individual, se engajar no sistema;
- (vi) Sinalizar o real valor econômico da água na estrutura proposta, de forma a alocar o recurso de forma eficiente e conscientizar os usuários de que o recurso é dotado de valor econômico, finito e escasso.

A estrutura do instrumento ALE será exemplificada, utilizando como área de estudo a bacia hidrográfica do rio São Marcos, e irá investigar soluções para um cenário de usos competitivos entre agricultura irrigada e geração hidrelétrica que sejam mutuamente benéficas para os usuários da bacia.

4.2. Metodologia

4.2.1. Aplicação da estrutura ALE (Alocação Negociada Hidro-Econômica) através de um sistema de contabilidade hídrica dinâmica

A contabilidade hídrica dinâmica é um sistema de informações estruturado para embasar a alocação negociada da água entre os usuários considerando variações espaciais e temporais na escassez. A contabilidade se utiliza das informações dinâmicas, no tempo e no espaço, do valor marginal da água, e do benefício econômico gerado pela alocação da vazão nos diferentes usos, para, a partir dessas informações, avaliar os *trade-offs* entre diferentes usos e levar em consideração os custos de oportunidade da água para embasar as negociações de alocação negociada de água.

Neste trabalho, o modelo hidroeconômico é utilizado de forma a se obter os subsídios para a alimentação de informações desta contabilidade, obtendo um mapeamento dos usos, demandas, e valores econômicos dos recursos hídricos no sistema São Marcos, para serem utilizados na estrutura ALE (Figura 4.2). Outras formas de obtenção das informações para alimentação da contabilidade hídrica dinâmica podem ser utilizadas.

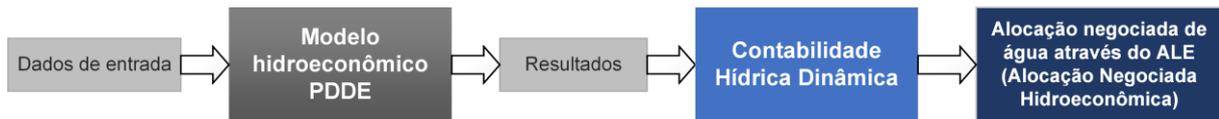


Figura 4.2 - Esquema descrevendo as etapas para alimentação da CHD

Para embasar a proposta, será empregado o modelo hidroeconômico já desenvolvido e elaboradas simulações do sistema sob diferentes cenários, explicados a seguir. O sistema modelado, nesse caso a bacia do rio São Marcos, foi discretizado em um modelo de arcos e nós, já descritos, representando os usos de geração de energia e agricultura irrigada na bacia do São Marcos.

A contabilidade é estruturada a partir das seguintes informações:

- Volume de água afluente aos reservatórios, considerando diferentes cenários de retiradas de água para a agricultura irrigada;
- Geração de energia pelos aproveitamentos hidrelétricos e retorno econômico;
- Uso da água por nó do sistema e por bloco do sistema;
- Benefício econômico gerado pelo uso na agricultura irrigada, por nó e por bloco do sistema;
- Valor marginal da água no cenário otimizado nos diferentes nós do sistema, considerando diferentes cenários de retiradas de água para a agricultura irrigada;
- Benefício econômico total do sistema, considerando diferentes cenários de retiradas de água para a agricultura irrigada;
- Benefício econômico gerado por unidade de área e de água, considerando diferentes cenários de retiradas de água para a agricultura irrigada.

Para fornecer essas informações, no modelo PDDE foram elaboradas rodadas de otimização com e sem agricultura irrigada), com discretização mensal de tempo. Os resultados do modelo permitem calcular os reflexos de um uso da água sobre o outro.

A seguir são apresentados os passos para a operacionalização da estrutura ALE:

1. Uma rodada de otimização é realizada, onde o modelo hidroeconômico determina a solução economicamente ótima da bacia, alocando a água livremente (sujeito apenas a restrições de balanço hídrico e limitações físicas do sistema) - de modo a maximizar o benefício econômico gerado. A solução é baseada no princípio da equimarginalidade das demandas e aloca a água de acordo com o seu valor. Como resultado são fornecidos os valores marginais da água em diferentes estágios de tempo em diferentes locais da bacia, a partir dos diferentes usos com diferentes benefícios agregados;
2. Uma segunda rodada de otimização é realizada priorizando o benefício econômico advindo da geração de energia hidrelétrica. Nesta rodada apenas é considerado o uso de geração de energia hidrelétrica;
3. A comparação entre os resultados de ambas as rodadas produz informações sobre os *trade-offs* entre os usos da agricultura irrigada e geração de energia hidrelétrica, sobre os benefícios globais da bacia, e dos valores marginais da água nos diferentes períodos e locais da bacia;

4. Na situação real, como a irrigação em sua maior parte se concentra a montante das UHEs, acaba por ter primeiro acesso à água. Isso resulta em menor água disponível para a geração de energia, com uma potencial redução em seu benefício econômico;
5. As duas rodadas de otimização realizadas fornecem informações sobre a magnitude e valor dessa redução, e sobre o benefício agregado que a agricultura irrigada traz ao sistema São Marcos como um todo;
6. Com essas informações - redução de benefício e os valores marginais - discretizadas mês a mês, para cada nó do sistema, é possível analisar os *trade-offs* entre os usos;
7. A partir dos *trade-offs*, a contabilidade hídrica dinâmica funciona como um sistema de informações que permite valorar as transações alocativas de água realizadas dentro do sistema.

Os seguintes exemplos ilustram uma aplicação do conceito na prática. Nestes exemplos, uma demanda hídrica é dividida em duas partes: uma demanda firme e uma demanda realocável. A demanda realocável é a parte da demanda que pode ser negociada no curto ou longo prazo. A definição da divisão deve ser acordada entre usuários, e aprovada pelo órgão gestor e instâncias superiores, a fim de se evitar externalidades para outros usuários. Ressalta-se que esse conceito deve ser tratado com bastante cuidado devido à sua sensibilidade, em termos político-institucionais. A demanda alocável pressupõe que o usuário agrícola precisaria compensar o hidrelétrico por essa parcela da demanda, e é discutível quais seriam os direitos desses usuários por essa parcela. O direito pode estar relacionado à outorga, e nesse caso, a demanda dos usuários que se encontram irregulares seria correspondente à parcela alocável, sendo um pré-requisito para sua regularização. Nesse caso, foge ao escopo desse trabalho detectar quais usuários são detentores de outorga, ou estão irregulares.

Sob outra abordagem, a parcela alocável pode ser referente àquela que está causando déficit na geração de energia hidrelétrica. Ainda que os usuários sejam detentores de outorga, a PNRH define a cobrança como instrumento, dos quais um dos objetivos é o de sinalizar aos usuários o valor da água. Nesse sentido, não haveria contraposição entre cobrar de usuários que já possuem outorga de uso da água, visto que a outorga é apenas uma permissão de uso, e não uma garantia de propriedade. Nesse trabalho é proposto um instrumento que considere o valor econômico da água como instrumento de alocação negociada, utilizando o valor marginal como guia para precificar o recurso hídrico. Nesse sentido, o valor marginal reflete os custos de oportunidade, que estão relacionados aos usos alternativos do recurso. É necessário, para que o valor do custo de oportunidade seja diferente de zero, que haja outro uso rival para o recurso, logo, independente das outorgas vigentes, ou dos direitos de uso, um instrumento que sinaliza o valor do recurso em relação aos seus usos alternativos é uma ferramenta com potencial para sinalizar aos usuários o valor da água, como preconiza a PNRH.

Como mencionado, dependendo do conceito que se pretende utilizar para definir as parcelas firme e alocável, é possível utilizar diferentes critérios. Aqui sugere-se como divisão o déficit de potência gerada mensal do reservatório no mês de transação, entre os dois arranjos, convertido em volume de água (ΔR), que representa quanto a usina deixou de gerar naquele mês. Como as usinas são em série,

e o mesmo volume de água passa por ambas as usinas, considera-se, a cada mês, o maior ΔR entre as duas usinas. Esta será a divisão utilizada neste trabalho.

Propostas alternativas de fracionamento da demanda firme/allocável pode ser:

- O déficit total turbinado somado de ambas as usinas;
- A proporção de estimativa de demanda outorgada e não outorgada na bacia (sendo a outorgada igual à demanda firme, e a não outorgada a allocável).

Independente do critério de fracionamento selecionado (como mencionado, isso pode ser objeto de negociação entre os usuários), segue a aplicação do conceito na prática:

1. Um usuário utilizando até a demanda firme não paga pela água;
2. Um usuário utilizando além da demanda firme deverá pagar pela água para ter acesso à demanda realocável. Nesse caso, o preço aplicado será:
 - a. Igual a zero se a água não for escassa no local e no instante de tempo em que o usuário se encontra;
 - b. Maior que zero se a água for escassa;
3. Em situações onde a água é escassa, o custo de oportunidade marginal reflete o custo de oportunidade para o uso de maior valor.
4. A escassez e o valor da demanda realocável irão sinalizar para os usuários que:
 - a. O local na bacia é importante. Por exemplo, o valor da água varia conforme a posição a montante ou a jusante dos aproveitamentos hidrelétricos, favorecendo a ocupação conforme o valor da água e desfavorecendo o uso ineficiente a montante de aproveitamentos hidrelétricos;
 - b. A época do ano é importante e garante maior ou menor disponibilidade, e deve ser concentrada a demanda motivando ajustes, quando possível, ao calendário de plantio e irrigação para tirar proveito da variação sazonal na disponibilidade hídrica e consequentemente no custo de oportunidade marginal.

Comparado com o sistema atual, onde usuários recebem uma alocação de água baseada apenas em (i) disponibilidade no rio e (ii) ordem de chegada e paga pelo seu uso segundo um valor fixo, o mecanismo aqui proposto oferece a vantagem de dar ao usuário a opção de pagar ou não pela água, conforme: (i) a quantidade utilizada; (ii) a vazão disponível no rio e (iii) sua posição na bacia hidrográfica.

No entanto, como a estrutura ALE aqui proposta apenas permite a compensação e alocação da demanda allocável, isso não será o suficiente para compensar toda a variação de benefício do setor elétrico, visto que no arranjo energético ele era o único usuário, e a variação de benefício do setor se dá da comparação entre os dois arranjos.

4.2.2. Correção dos balanços através do mecanismo compensatório

Para compensar esta parcela da variação, propõe-se uma correção dos valores unitários cobrados pela demanda alocável, de forma a atingir o valor total de variação do benefício do setor elétrico. Isso será feito diretamente a partir do balanço de compensações calculadas com o valor marginal, e partir desse arranjo para ajustar até o balanço corrigido, através de uma ferramenta de otimização que minimize a perda de benefício econômico do setor hidrelétrico, utilizando como restrição que o setor agrícola mantenha seus ganhos líquidos positivos em todos os meses.

Com isso pretende-se atingir uma configuração de alocação mais eficiente na bacia, e utilizar os próprios incentivos do sistema institucional de cobrança e de compensação, trabalhando com a estrutura ALE para superar os problemas de escassez e operacionalizar essa ferramenta como instrumento econômico de gestão.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Estrutura ALE (alocação negociada hidro-econômica)

O exemplo de aplicação da estrutura ALE é a bacia do São Marcos. Conforme demonstrado no item 3.3.1.3.2, a inclusão da agricultura irrigada no sistema São Marcos gera um benefício de cerca de R\$ 200 milhões anuais, a um custo de cerca de R\$ 20 a 30 milhões ao setor hidrelétrico. Nas premissas deste trabalho se discutiu a conjuntura atual da região da bacia, onde a presença da agricultura irrigada compete pela água com a geração hidrelétrica localizadas na calha do rio São Marcos. Entre as soluções do problema propostas pela ANA na Nota Técnica nº 104/2020 (ANA, 2010b), foi proposta uma campanha de fiscalização com o objetivo de interromper as captações dos usuários sem outorga. Neste mesmo documento, a ANA reconhece que haveria evidente consequência econômica para a região, e a partir dos resultados observados neste trabalho, em especial da receita verificada advinda deste setor, considera-se que o prejuízo socioeconômico seria potencialmente alto caso se aplicasse a solução citada.

O emprego da alocação negociada da água como instrumento de gestão, embasado por um sistema de contabilidade hídrica dinâmica, como o proposto no presente trabalho, busca ampliar o leque de alternativas de alocação à disposição dos usuários e ao mesmo tempo contribuir com a eficiência econômica do uso da água na bacia.

Dado o uso que o setor hidrelétrico faz do recurso, o valor marginal da água a montante das turbinas possui um valor consideravelmente mais elevado que o valor a jusante, depois de gerar energia nas duas UHE's localizadas em série. A concentração da maior parte da agricultura irrigada na cabeceira da bacia apresenta então custos de oportunidade mais altos do que a jusante.

A estrutura do sistema de alocação negociada proposta neste trabalho consiste em definir o valor da água, variável no espaço e no tempo, e empregar esse valor em um mecanismo de cobrança (variável no espaço e no tempo) pelo uso de parte da água consumida pelos usuários do setor agrícola na bacia do rio São Marcos, de modo a refletir o custo de oportunidade marginal da água em vista do

seu uso na produção de hidroeletricidade na bacia. Tal custo de oportunidade deverá sinalizar aos usuários agrícolas o real valor do recurso hídrico que está sendo utilizado pelos mesmos.

No sistema de alocação negociada, o usuário agrícola teria como opções (i) utilizar apenas a quantidade de água que não interfira na operação do arranjo energético dos reservatórios, e por conseguinte na energia gerada, denominada parcela firme (w_{fir}); ou (ii) utilizar uma quantidade maior, denominada parcela alocável (w_{aloc}), e pagar pelo uso da água um valor coerente com o seu custo marginal de oportunidade para a geração de energia, que varia de um mês para outro conforme a disponibilidade hídrica e também varia conforme a localização do usuário agrícola na bacia.

Como se trata de um instrumento de alocação negociada, a transação depende de um comum acordo entre o usuário agrícola e a empresa geradora. Naturalmente, um instrumento de alocação negociada carece ainda de uma série de dispositivos legais, institucionais e ainda consideração de custos de transação. Esses aspectos são importantes, porém, fogem do escopo do trabalho de mestrado aqui desenvolvido, cujo foco é mostrar os fundamentos do instrumento a partir da contabilidade hídrica dinâmica.

Para exemplificar o funcionamento do sistema, seguem os passos para o cálculo do mecanismo compensatório:

1. São adquiridos os dados necessários para agricultura irrigada e geração de energia hidrelétrica e incluídos no modelo hidroeconômico;
2. O modelo calendário agrícola é rodado para obter as demandas objetivo - a demanda hídrica necessária para maximizar a produção agrícola - do setor da agricultura irrigada;
3. O modelo PDDE é rodado para dois arranjos de alocação: (1) apenas energia ou “energético” e (2) energia e agricultura irrigada “econômico”.
4. Excluem-se o primeiro e o último ano, para minimizar as interferências das condições inicial e final;
5. São calculados os volumes de água entregues às demandas para agricultura irrigada w (hm^3) - as demandas que foram efetivamente consumidas pelo setor no arranjo (2);
6. Cada demanda é dada em um determinado nó, que possui uma localização diferente dentro do sistema São Marcos. Os nós 1 (Rio Samambaia), 2 (São Marcos Cabeceira), 12 (Irrigação Minas Gerais) e 10 (Consumo Batalha) se localizam a montante da UHE Batalha. O nó 11 (Consumo Serra do Facão) se localiza a jusante de Batalha e a montante da UHE Serra do Facão, e o nó 9 (Exutório) se localiza a jusante de Serra do Facão. São obtidas demandas atendidas w para cada mês em cada nó;
7. É calculada a potência média mensal gerada em cada arranjo P_{ener} (arranjo 1) e P_{econ} (arranjo 2) (MW), e a perda energética ΔP (MW) entre o arranjo energético (1) e econômico (2);
8. A perda energética ΔP (MW) é transformada em perda de volume turbinado estimado ΔR (hm^3), através dos coeficientes de produtividade das usinas;
9. A partir da perda de volume turbinado ΔR , é definida a parcela da demanda w “devida” às usinas, que será chamada de parcela alocável w_{aloc} (hm^3), sendo o restante a parcela firme

- w_{fir} . É considerado como ΔR , a maior redução de vazão turbinada entre as duas usinas, e não a soma das duas, visto que elas estão em série.
10. Dada essa configuração de topologia, o valor marginal da água λ (R\$/m³) é gerado para cada localização e para cada mês;
 11. A partir da demanda agrícola w e do valor marginal λ em um dado nó, é calculado o custo de oportunidade total (C_w) para a respectiva demanda e respectivo nó, e também o custo de oportunidade da porção realocável da demanda $C_{w,aloc}$, calculado apenas para a parcela alocável da demanda;
 12. O benefício econômico (B_w) gerado em um dado nó, em um dado mês, é produto do consumo de água no respectivo nó, para as culturas daquele nó;
 13. Tratando o custo de oportunidade total como o valor cobrado pelo uso da água, é possível obter o benefício econômico líquido $B_{w,aloc}^L$ pelo benefício econômico B_w menos o valor cobrado π_{aloc} , e o benefício econômico líquido potencial B_w^L caso fosse transacionada toda a demanda possível de água, $w_{fir} + w_{aloc}$;
 14. É obtida a perda de benefício econômico para cada UHEs ω (R\$) entre os arranjos energético (1) e econômico (2), causada pela inclusão da agricultura irrigada no sistema;
 15. O custo de oportunidade do uso da água pela agricultura C_w e $C_{w,aloc}$ será o valor da compensação π e π_{aloc} , pago ao setor hidrelétrico;
 16. Como a redução das vazões é compartilhada entre as UHEs em série, é necessário ponderar as perdas econômicas ω em percentual para as duas UHEs, (ω_{BTL}/ω e ω_{SRFC}/ω) para a distribuição da compensação;
 17. A parcela de π_{aloc} dada a cada UHE é dada pelos percentuais ω_{BTL}/ω e ω_{SRFC}/ω , para os nós que estão a montante de ambas as UHE's, e paga integralmente à UHE Serra do Facão para o nó 11, posicionado entre as duas hidrelétricas. A parcela π indica quanto seria o valor da compensação para todo o volume da demanda w ;
 18. O benefício líquido da compensação π_{aloc}^L é dado pela diferença entre o prejuízo ω e a compensação π_{aloc} , e o mesmo se aplica ao benefício líquido total π^L .

Do Quadro 4.1 ao Quadro 4.8 estão apresentadas simulações da CHD para os meses de Maio/02, Julho/02, Novembro/03 e Abril/04, para os cenários de 90% e 10% de permanência, para exemplificar as transações e mecanismos compensatórios possibilitados pela CHD.

Optou-se por contabilizar e apresentar não apenas os valores de demanda alocável, mas também os totais, para se ter uma dimensão dos valores potenciais que podem ser atingidos com outras quotas de demanda. Nos quadros a seguir, as células em cinza contêm dados obtidos por meio do modelo hidroeconômico PDDE e as células em verde contêm os valores das parcelas alocáveis pela agricultura, calculados posteriormente.

Quadro 4.1 - Transações mensais no mês de maio/02 no cenário de 90% de permanência

Nó	w		w _{fir} (hm ³)	W _{aloc} (hm ³)	λ (R\$/1.000m ³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w,aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B ^L _w (R\$ 1.000)	B ^L _{w,aloc} (R\$ 1.000)
	w (hm ³)	%								
1 - Rio Samambaia	11,01	17%	7,31	3,70	100,12	R\$ 1.102,29	R\$ 370,58	R\$ 6.202,61	R\$ 5.100,32	R\$ 5.832,02
2 - São Marcos Montante	5,71	9%	3,79	1,92	100,12	R\$ 571,56	R\$ 192,15	R\$ 3.598,18	R\$ 3.026,62	R\$ 3.406,02
12 - Irrigação Minas Gerais	18,96	30%	12,59	6,37	100,12	R\$ 1.898,50	R\$ 638,27	R\$ 10.865,35	R\$ 8.966,85	R\$ 10.227,08
10 - Consumo Batalha	14,42	23%	9,57	4,85	100,12	R\$ 1.443,88	R\$ 485,42	R\$ 11.348,15	R\$ 9.904,27	R\$ 10.862,73
11 - Consumo Serra do Facão	12,88	20%	8,55	4,33	71,66	R\$ 922,85	R\$ 310,26	R\$ 9.859,06	R\$ 8.936,21	R\$ 9.548,81
9 - Exutório	0,98	2%	0,65	0,33	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 362,79	R\$ 362,79	R\$ 362,79
Total	63,95	100%	42,45	21,50	-	R\$ 5.939,07	R\$ 1.996,68	R\$ 42.236,13	R\$ 36.297,07	R\$ 40.239,45
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π ^L _{aloc} (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm ³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	28,96	27,22	1,74	11,88	-R\$ 485,17	22,57%	R\$ 1.132,27	R\$ 647	R\$ 381	-R\$ 105
8 - Serra do Facão	121,86	115,88	5,97	21,50	-R\$ 1.664,25	77,43%	R\$ 4.806,80	R\$ 3.143	R\$ 1.616,02	-R\$ 48
Total	150,81	143,10	5,97	21,50	-R\$ 2.149,41	100,00%	R\$ 5.939	R\$ 3.790	R\$ 1.996,68	-R\$ 153

Quadro 4.2 - Transações mensais no mês de maio/02 no cenário de 10% de permanência

Nó	w		w _{fir} (hm ³)	W _{aloc} (hm ³)	λ (R\$/1.000m ³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w,aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B ^L _w (R\$ 1.000)	B ^L _{w,aloc} (R\$ 1.000)
	w (hm ³)	%								
1 - Rio Samambaia	11,01	17%	9,68	1,33	76,02	R\$ 836,95	R\$ 101,05	R\$ 6.202,61	R\$ 5.365,66	R\$ 6.101,56
2 - São Marcos Montante	5,71	9%	5,02	0,69	76,02	R\$ 433,97	R\$ 52,40	R\$ 3.598,18	R\$ 3.164,20	R\$ 3.545,78
12 - Irrigação Minas Gerais	18,96	30%	16,67	2,29	76,02	R\$ 1.441,50	R\$ 174,04	R\$ 10.865,35	R\$ 9.423,85	R\$ 10.691,31
10 - Consumo Batalha	14,42	23%	12,68	1,74	76,02	R\$ 1.096,31	R\$ 132,37	R\$ 11.348,15	R\$ 10.251,84	R\$ 11.215,78
11 - Consumo Serra do Facão	12,88	20%	11,32	1,55	55,01	R\$ 708,38	R\$ 85,53	R\$ 9.859,06	R\$ 9.150,68	R\$ 9.773,53
9 - Exutório	0,98	2%	0,86	0,12	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 362,79	R\$ 362,79	R\$ 362,79
Total	63,95	100%	56,23	7,72	-	R\$ 4.517,12	R\$ 545,38	R\$ 42.236,13	R\$ 37.719,02	R\$ 41.690,75
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π ^L _{aloc} (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm ³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	44,46	44,07	0,39	2,67	-R\$ 109,01	15,43%	R\$ 587,52	R\$ 479	R\$ 71	-R\$ 38
8 - Serra do Facão	192,35	190,20	2,14	7,72	-R\$ 597,68	84,57%	R\$ 3.929,60	R\$ 3.332	R\$ 474,45	-R\$ 123
Total	236,80	234,27	2,14	7,72	-R\$ 706,69	100,00%	R\$ 4,517	R\$ 3,810	R\$ 545	-R\$ 161

Exemplificando, no Quadro 4.1, a agricultura irrigada no nó de demanda Rio Samambaia deseja retirar um total de 11,01 hm³ (**w**) no mês de maio e esse volume de água encontra-se disponível no rio. Caso a agricultura irrigada Rio Samambaia deseje retirar mais água, poderia fazê-lo até o limite de 3,7 hm³ adicionais (**w_{aloc}**) pagando R\$ 100,12/1.000m³, que é o valor marginal da água naquele ponto e mês. O resultado dessa transação é uma fatura total de R\$ 370.580,00 (**C_{w,aloc}**). Ao utilizar o volume máximo de água desejado, de 11,01 hm³ (**w**), o nó de demanda Rio Samambaia iria auferir um benefício total igual a R\$ 6,202 milhões (**B_w**). Subtraindo desse benefício **B_w** total o valor devido pelo uso dos 3,7 hm³ realocados (R\$ 370.580,00) temos um benefício líquido após alocação igual a R\$5.832 milhões (**B^L_{w,aloc}**).

Caso a agricultura irrigada Rio Samambaia prefira não pagar pela realocação, terá acesso apenas aos 7.31 hm³ (**w_{fir}**), e nesse caso, o seu benefício econômico será igual a R\$ 5.100 milhões (**B^L_w**). Ou seja, os 3,7 hm³ não alocados nesse caso deixam de trazer para a agricultura o valor de **C_w** (R\$1,102 milhões). Esse valor é a diferença que falta para atingir o benefício total **B_w** de R\$ 6,202 milhões.

É possível perceber que o usuário agrícola (Rio Samambaia) nesse caso ainda iria auferir um benefício (R\$1,102 milhões) que é superior ao pago (R\$ 370.580,00) para ter acesso aos 3,7 hm³ realocáveis. A diferença nesse caso é um saldo positivo de R\$ 731.710,00 para Rio Samambaia. Considerando toda a área de agricultura irrigada modelada, poderiam ser transferidos um total de 21,5 hm³ vindos da geração de energia, com potencial para produzir benefícios totais de R\$ 3.942 milhões para toda a área irrigada na bacia (**B^L_{w,aloc} - B^L_w**) no mês de maio (Quadro 4.1). Nesse caso, seriam devidos aos geradores de hidroeletricidade a fatura total de R\$ 1,996 milhões (**C_{w,aloc}**), que, descontada dos benefícios totais de R\$3.942 milhões, resultariam ainda em um saldo positivo para a agricultura irrigada igual a R\$1,945 milhões.

Analisando agora a transação do lado do gerador de hidroeletricidade. A perda de benefício econômico na geração hidrelétrica **w** produzida pela realocação de 21,35 hm³ para a agricultura totaliza R\$ 2,149 milhões, distribuídos entre as usinas conforme o Quadro 4.1. Nesse ponto, é possível verificar que essa perda é superior ao valor total pago às usinas pela realocação (R\$1,996 milhões), existindo um benefício líquido da compensação **π^L_{aloc}** negativo, em R\$ 153.000,00. Esse caso indica que a cobrança apenas não seria suficiente para compensar a perda de benefício econômico na geração hidrelétrica. Porém, esse saldo negativo representa apenas 7,8% do saldo positivo que restou à agricultura irrigada após o pagamento pela água (que foi de R\$1,945 milhões como já mostrado). Nesse caso, seria possível ainda negociar uma complementação para zerar o saldo negativo. Se isso for feito, as usinas encerrariam o mês de maio com perdas iguais a zero e a produção agrícola ainda com um saldo positivo final de R\$1,792 milhões (R\$1,945 milhões - R\$153.000). Como se trata de um valor mensal, é pouco provável que o mesmo seja inferior aos custos de transação, necessários para dar suporte a todo o sistema de monitoramento e contabilidade hídrica.

Os demais quadros repetem o exercício para outros meses do ano e outros cenários de permanência. Avaliar outros cenários de permanência adiciona uma informação importante referente ao risco associado às transações. Nesse caso, comparando o Quadro 4.1 e o Quadro 4.2 é possível

verificar que em 90% dos meses de maio o saldo positivo seria de R\$ 1,792 milhões (pior situação) enquanto que nos 10% meses de maio mais favoráveis esse saldo poderia chegar a R\$ 3,265 milhões. Por restrições de espaço, foram analisados aqui apenas os cenários com 90% e 10% de probabilidade de excedência, entretanto, a ALE pode fornecer qualquer outro valor entre 0 e 100%.

Quadro 4.3 - Transações mensais no mês de julho/03 no cenário de 90% de permanência

Nó	w		w _{fir} (hm³)	w _{aloc} (hm³)	λ (R\$/1.000m³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w,aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B _w ^L (R\$ 1.000)	B _{w,aloc} ^L (R\$ 1.000)
	w (hm³)	%								
1 - Rio Samambaia	9,31	10%	9,31	0,00	272,18	R\$ 2.533,01	R\$ 0,00	R\$ 6.439,57	R\$ 3.906,56	R\$ 6.439,57
2 - São Marcos Montante	9,87	11%	9,87	0,00	77,42	R\$ 764,10	R\$ 0,00	R\$ 4.431,50	R\$ 3.667,40	R\$ 4.431,50
12 - Irrigação Minas Gerais	32,11	34%	32,11	0,00	77,42	R\$ 2.486,19	R\$ 0,00	R\$ 13.675,48	R\$ 11.189,29	R\$ 13.675,48
10 - Consumo Batalha	19,57	21%	19,57	0,00	140,88	R\$ 2.756,90	R\$ 0,00	R\$ 12.012,91	R\$ 9.256,00	R\$ 12.012,91
11 - Consumo Serra do Facão	21,35	23%	21,35	0,00	131,47	R\$ 2.807,05	R\$ 0,00	R\$ 11.578,11	R\$ 8.771,06	R\$ 11.578,11
9 - Exutório	1,65	2%	1,65	0,00	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 551,24	R\$ 551,24	R\$ 551,24
Total	93,87	100%	93,87	0,00	-	R\$ 11.347,25	R\$ 0,00	R\$ 48.688,82	R\$ 37.341,57	R\$ 48.688,82
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π _{aloc} ^L (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	18,61	20,73	-2,12	-14,44	R\$ 0,00	-	-	-	-	-
8 - Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	0,00	R\$ 0,00	-	-	-	-	-
Total	18,61	20,73	0,00	0,00	R\$ 0,00	-	-	-	-	-

Quadro 4.4 - Transações mensais no mês de julho/03 no cenário de 10% de permanência

Nó	w		w _{fir} (hm³)	w _{aloc} (hm³)	λ (R\$/1.000m³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w,aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B _w ^L (R\$ 1.000)	B _{w,aloc} ^L (R\$ 1.000)
	w (hm³)	%								
1 - Rio Samambaia	20,31	18%	18,90	1,41	140,86	R\$ 2.861,28	R\$ 198,46	R\$ 7.979,98	R\$ 5.118,70	R\$ 7.781,52
2 - São Marcos Montante	9,87	9%	9,19	0,68	77,05	R\$ 760,50	R\$ 52,75	R\$ 4.431,50	R\$ 3.671,00	R\$ 4.378,75
12 - Irrigação Minas Gerais	32,11	28%	29,89	2,23	77,05	R\$ 2.474,49	R\$ 171,63	R\$ 13.675,48	R\$ 11.200,99	R\$ 13.503,85
10 - Consumo Batalha	27,06	24%	25,18	1,88	77,05	R\$ 2.084,75	R\$ 144,60	R\$ 13.033,05	R\$ 10.948,30	R\$ 12.888,45
11 - Consumo Serra do Facão	23,58	21%	21,94	1,64	54,71	R\$ 1.289,99	R\$ 89,48	R\$ 11.881,64	R\$ 10.591,65	R\$ 11.792,16
9 - Exutório	1,65	1%	1,54	0,11	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 551,24	R\$ 551,24	R\$ 551,24
Total	114,59	100%	106,64	7,95	-	R\$ 9.471,02	R\$ 656,92	R\$ 51.552,90	R\$ 42.081,89	R\$ 50.895,98
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π _{aloc} ^L (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	35,46	34,29	1,17	7,95	-R\$ 231,54	100,00%	R\$ 6.884,87	R\$ 6.653	R\$ 567	R\$ 336
8 - Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	0,00	R\$ 0,00	0,00%	R\$ 1.289,99	R\$ 1.290	R\$ 89,48	R\$ 89
Total	35,46	34,29	1,17	7,95	-R\$ 231,54	100,00%	R\$ 8.175	R\$ 7.943	R\$ 657	R\$ 425

Dois outros aspectos emergem dos resultados. No Quadro 4.3 (mês de julho, 90%) não há redução de vazão turbinada ΔR^{18} , logo, não há demanda alocável. Para o Quadro 4.4 (mês de julho, 10%), o benefício líquido da compensação π^{L}_{aloc} é positivo, indicando que nesses casos apenas a cobrança seria suficiente para compensar a perda de benefícios para a geração hidrelétrica se a água for realocada, sem a necessidade de uma compensação adicional para zerar o saldo. Nesse situação, considerando toda a área de agricultura irrigada modelada, poderiam ser transferidos um total de 7,95 hm³ vindos da geração de energia, com potencial para produzir benefícios totais de R\$ 8,814 milhões para toda a área irrigada na bacia ($B^{L}_{w,aloc} - B^{L}_w$). Nesse caso, seriam devidos aos geradores de hidroeletricidade a fatura total de R\$ 656.000,00 ($C_{w,aloc}$), que, descontada dos benefícios totais de R\$ 8,814 milhões, resultariam ainda em um saldo positivo para a agricultura irrigada igual a R\$ 8,157 milhões. Do lado da geração hidrelétrica, a perda de benefício econômico ω produzida pela realocação dos 7,95 hm³ totaliza R\$ 251.034,00, que, descontados do total recebido de R\$ 656.000,00 ($C_{w,aloc}$) pagos pelos usuários agrícolas, produziria um saldo positivo π^{L}_{aloc} de R\$ 425 milhões.

As situações apresentadas no Quadro 4.5 ao Quadro 4.8 repetem os mesmos casos: ou não há redução de vazão turbinada ΔR , ou a compensação zera a perda para o setor elétrico, ou ainda há déficit no setor elétrico, mesmo após a compensação.

¹⁸ Nesse mês, atipicamente, há inclusive incremento da vazão turbinada. É um caso isolado que se deu devido a diferenças nas decisões operacionais do modelo em relação aos dois arranjos

Quadro 4.5 - Transações mensais no mês de novembro/03 no cenário de 90% de permanência

Nó	w		w _{fir} (hm ³)	W _{aloc} (hm ³)	λ (R\$/1000m ³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w,aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B ^L _w (R\$ 1.000)	B ^L _{w,aloc} (R\$ 1.000)
	w (hm ³)	%								
1 - Rio Samambaia	0,44	13%	0,44	0,00	81,57	R\$ 36,27	R\$ 0,00	R\$ 297,98	R\$ 261,72	R\$ 297,98
2 - São Marcos Montante	0,20	6%	0,20	0,00	81,57	R\$ 16,20	R\$ 0,00	R\$ 133,13	R\$ 116,93	R\$ 133,13
12 - Irrigação Minas Gerais	0,65	19%	0,65	0,00	81,57	R\$ 53,04	R\$ 0,00	R\$ 435,85	R\$ 382,80	R\$ 435,85
10 - Consumo Batalha	0,58	17%	0,58	0,00	81,57	R\$ 47,49	R\$ 0,00	R\$ 390,22	R\$ 342,73	R\$ 390,22
11 - Consumo Serra do Facão	1,21	35%	1,21	0,00	57,51	R\$ 69,71	R\$ 0,00	R\$ 812,47	R\$ 742,75	R\$ 812,47
9 - Exutório	0,37	11%	0,37	0,00	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 161,91	R\$ 161,91	R\$ 161,91
Total	3,46	100%	3,46	0,00	-	R\$ 222,72	R\$ 0,00	R\$ 2.231,57	R\$ 2.008,85	R\$ 2.231,57
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π ^L _{aloc} (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm ³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	0,00	0,00	0,00	0,00	R\$ 0,00	-	-	-	-	-
8 - Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	0,00	R\$ 0,00	-	-	-	-	-
Total	0,00	0,00	0,00	0,00	R\$ 0,00	-	-	-	-	-

Quadro 4.6 - Transações mensais no mês de novembro/03 no cenário de 10% de permanência

Nó	w		w _{fir} (hm ³)	W _{aloc} (hm ³)	λ (R\$/1000m ³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w,aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B ^L _w (R\$ 1.000)	B ^L _{w,aloc} (R\$ 1.000)
	w (hm ³)	%								
1 - Rio Samambaia	0,44	10%	0,00	0,44	60,57	R\$ 26,93	R\$ 26,93	R\$ 297,98	R\$ 271,05	R\$ 271,05
2 - São Marcos Montante	0,20	4%	0,00	0,20	60,57	R\$ 12,03	R\$ 12,03	R\$ 133,13	R\$ 121,10	R\$ 121,10
12 - Irrigação Minas Gerais	0,65	14%	0,00	0,65	60,57	R\$ 39,39	R\$ 39,39	R\$ 435,85	R\$ 396,46	R\$ 396,46
10 - Consumo Batalha	0,58	13%	0,00	0,58	60,57	R\$ 35,27	R\$ 35,27	R\$ 390,22	R\$ 354,95	R\$ 354,95
11 - Consumo Serra do Facão	2,38	51%	0,00	2,38	42,34	R\$ 100,66	R\$ 100,66	R\$ 867,96	R\$ 767,30	R\$ 767,30
9 - Exutório	0,37	8%	0,00	0,37	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 161,91	R\$ 161,91	R\$ 161,91
Total	4,63	100%	0,00	4,63	-	R\$ 214,28	R\$ 214,28	R\$ 2.287,06	R\$ 2.072,78	R\$ 2.072,78
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π ^L _{aloc} (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm ³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	37,51	23,41	14,10	96,17	-R\$ 2.258,54	28,05%	R\$ 31,87	-R\$ 2.227	R\$ 32	-R\$ 2.227
8 - Serra do Facão	133,28	97,12	36,16	130,18	-R\$ 5.792,78	71,95%	R\$ 182,41	-R\$ 5.610	R\$ 182,41	-R\$ 5.610
Total	170,79	120,53	36,16	130,18	-R\$ 8.051,32	100,00%	R\$ 214	-R\$ 7.837	R\$ 214	-R\$ 7.837

Quadro 4.7 - Transações mensais no mês de abril/04 no cenário de 90% de permanência

Nó	W		W _{fir} (hm ³)	W _{aloc} (hm ³)	λ (R\$/1.000m ³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w.aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B ^L _w (R\$ 1.000)	B ^L _{w.aloc} (R\$ 1.000)
	w (hm ³)	%								
1 - Rio Samambaia	11,01	17%	7,74	3,27	70,63	R\$ 777,60	R\$ 230,96	R\$ 6.202,61	R\$ 5.425,01	R\$ 5.971,64
2 - São Marcos Montante	5,71	9%	4,01	1,70	70,63	R\$ 403,20	R\$ 119,76	R\$ 3.598,18	R\$ 3.194,98	R\$ 3.478,42
12 - Irrigação Minas Gerais	18,96	30%	13,33	5,63	70,63	R\$ 1.339,28	R\$ 397,79	R\$ 10.865,35	R\$ 9.526,07	R\$ 10.467,56
10 - Consumo Batalha	14,42	23%	10,14	4,28	70,63	R\$ 1.018,57	R\$ 302,54	R\$ 11.348,15	R\$ 10.329,58	R\$ 11.045,61
11 - Consumo Serra do Facão	12,88	20%	9,05	3,82	54,42	R\$ 700,83	R\$ 208,16	R\$ 9.859,06	R\$ 9.158,23	R\$ 9.650,90
9 - Exutório	0,98	2%	0,69	0,29	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 362,79	R\$ 362,79	R\$ 362,79
Total	63,95	100%	44,96	19,00	-	R\$ 4.239,48	R\$ 1.259,21	R\$ 42.236,13	R\$ 37.996,66	R\$ 40.976,92
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π ^L _{aloc} (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm ³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	31,78	29,00	2,78	19,00	-R\$ 385,73	36,19%	R\$ 1.280,76	R\$ 895	R\$ 380	-R\$ 5
8 - Serra do Facão	154,85	153,14	1,71	6,14	-R\$ 680,01	63,81%	R\$ 2.958,71	R\$ 2.279	R\$ 878,80	R\$ 199
Total	186,63	182,14	2,78	19,00	-R\$ 1.065,75	100,00%	R\$ 4.239	R\$ 3.174	R\$ 1.259	R\$ 193

Quadro 4.8 - Transações mensais no mês de abril/04 no cenário de 10% de permanência

Nó	w		W _{fir} (hm ³)	W _{aloc} (hm ³)	λ (R\$/1000m ³)	C _w (R\$ 1.000)	C _{w.aloc} (R\$ 1.000)	B _w (R\$ 1.000)	B ^L _w (R\$ 1.000)	B ^L _{w.aloc} (R\$ 1.000)
	w (hm ³)	%								
1 - Rio Samambaia	11,01	17%	10,55	0,46	69,61	R\$ 766,35	R\$ 31,98	R\$ 6.202,61	R\$ 5.436,25	R\$ 6.170,63
2 - São Marcos Montante	5,71	9%	5,47	0,24	69,61	R\$ 397,37	R\$ 16,58	R\$ 3.598,18	R\$ 3.200,81	R\$ 3.581,60
12 - Irrigação Minas Gerais	18,96	30%	18,17	0,79	69,61	R\$ 1.319,91	R\$ 55,07	R\$ 10.865,35	R\$ 9.545,44	R\$ 10.810,28
10 - Consumo Batalha	14,42	23%	13,82	0,60	69,61	R\$ 1.003,84	R\$ 41,88	R\$ 11.348,15	R\$ 10.344,31	R\$ 11.306,26
11 - Consumo Serra do Facão	12,88	20%	12,34	0,54	54,42	R\$ 700,83	R\$ 29,24	R\$ 9.859,06	R\$ 9.158,23	R\$ 9.829,82
9 - Exutório	0,98	2%	0,93	0,04	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 362,79	R\$ 362,79	R\$ 362,79
Total	63,95	100%	61,29	2,67	-	R\$ 4.188,31	R\$ 174,76	R\$ 42.236,13	R\$ 38.047,83	R\$ 42.061,38
UHE	P				ω		π (R\$ 1.000)	π ^L (R\$ 1.000)	π _{aloc} (R\$ 1.000)	π ^L _{aloc} (R\$ 1.000)
	P _{ener} (MW)	P _{econ} (MW)	ΔP (MW)	ΔR (hm ³)	ω (R\$ 1.000)	%				
6 - Batalha	44,64	44,25	0,39	2,67	R\$ 0,00	0,00%	R\$ 0,00	R\$ 0	R\$ 0	R\$ 0
8 - Serra do Facão	194,76	194,24	0,52	1,86	-R\$ 325,57	100,00%	R\$ 4.188,31	R\$ 3.863	R\$ 174,76	-R\$ 151
Total	239,40	238,49	0,52	2,67	-R\$ 325,57	100,00%	R\$ 4.188	R\$ 3.863	R\$ 175	-R\$ 151

Onde,

w é o volume de água retirado para agricultura irrigada [hm^3]

w_{fir} é o volume não alocável [hm^3]

w_{aloc} é o volume alocável [hm^3]

λ é o valor marginal da água [$\text{R}\$/\text{m}^3$]

C_w é o custo de oportunidade da água retirada para irrigação [$\text{R}\$$]

$C_{w,\text{aloc}}$ é o custo de oportunidade da parcela alocável de água [$\text{R}\$$]

B_w é o benefício econômico gerado pela agricultura irrigada [$\text{R}\$$]

B_w^L é o benefício líquido após o pagamento da cobrança caso fosse transacionada toda a demanda [$\text{R}\$$]

$B_{w,\text{aloc}}^L$ é o benefício líquido da parcela alocável após o pagamento da cobrança [$\text{R}\$$]

P_{ener} é a potência média mensal produzida no arranjo energético [MW]

P_{econ} é a potência média mensal produzida no arranjo econômico [MW]

ΔP é a variação da potência produzida entre os arranjos [MW]

ΔR é a estimativa da variação de volume turbinado entre os arranjos [hm^3]

ω é a variação de benefício econômico do setor hidrelétrico entre os arranjos [$\text{R}\$$]

π é o valor da compensação total, de toda a demanda w [$\text{R}\$$]

π^L é o valor líquido da compensação total, de toda a demanda w [$\text{R}\$$]

π_{aloc} é o valor da compensação pago pela parcela alocável, cujo total para o sistema é igual a C_w [$\text{R}\$$]

π_{aloc}^L é o valor líquido da compensação alocável, dado pelo saldo entre prejuízo ω e compensação π_{aloc} [$\text{R}\$$]

Como apresentado, os resultados representam como a ALE funcionaria mês a mês, a partir da contabilidade hídrica dinâmica obtida a partir do modelo hidroeconômico. Os meses representam algumas diferentes situações que podem ocorrer com esse mecanismo.

O critério utilizado como o objetivo para definir a demanda alocável foi o déficit hídrico estimado ΔR da UHE para gerar a mesma quantidade de energia que ela havia gerado naquele mesmo mês, no arranjo energético. No entanto, esse método apresenta duas limitações: (i) o armazenamento dos reservatórios, que podem optar por armazenar água ao invés de turbinar, visto que no arranjo econômico a água é mais escassa; e (ii) o coeficiente de produtividade utilizado para transformar ΔP em ΔR varia com a altura da coluna d'água do reservatório. Essas duas limitações trazem distorções para o valor da demanda alocável.

Ao reproduzir a ALE mensalmente durante um ano, a primeira limitação é mitigada, pois a distorção causada pelo armazenamento tende a ser compensada ao longo de um ciclo hidrológico anual, passando por todos os meses de um ano, com as variações do preço da energia. A segunda limitação tende a não trazer distorções tão grandes ao resultado acumulado.

É possível observar que, embora em nem todos os meses as perdas da geração hidrelétrica possam ser diretamente compensadas com a cobrança, em vários essa perda ainda poderia ser zerada com uma compensação adicional ainda inferior ao ganho auferido pela agricultura com a realocação.

Em alguns meses o prejuízo da usina hidrelétrica não foi totalmente ressarcido pelo mecanismo compensatório, porém, caso fosse transacionada toda a quota, da demanda firme w_{fir} + demanda alocável w_{aloc} , em alguns meses a compensação final π^L seria positiva para ambas as UHEs.

Isso é um assunto que pode vir a suscitar bastante discussão, pois há controvérsias sobre como se dão os direitos de uso nessa bacia, levantadas nas notas técnicas já citadas. Além dos usuários sem outorga, a ANA levanta a possibilidade até mesmo de revogar todas as outorgas cuja demanda supera a Declaração de Reserva de Disponibilidade Hídrica (DRDH) das usinas hidrelétricas, o que demonstra que, do ponto de vista dos gestores institucionais da bacia, não está claro se os usuários irrigantes possuem de fato direitos aos usos em vigor. O critério para definição da parcela firme *versus* alocável utilizado foi o de alocar água o suficiente atingir o valor de energia gerado no arranjo energético mês a mês, mas poderia ser de alocar apenas a parcela outorgada, ou o suficiente para atingir a DRDH. Isso depende de uma conjuntura institucional e do objetivo que se pretende atingir com a alocação de água na bacia.

Como o valor dos custos de oportunidade são inferiores ao benefício obtido, a cobrança não tornará inviável a operação da agricultura irrigada nessa região. Mesmo nos meses onde há escassez nas cabeceiras, e os valores marginais se tornam muito altos, ainda assim o benefício obtido supera o custo de oportunidade, o que demonstra o valor agregado do setor neste contexto.

Dito isso, serão apresentados os balanços das compensações, e em seguida uma proposição de ajuste para compensar totalmente o setor elétrico. Essas transações finalizariam os meses compensando o setor hidrelétrico pelas suas perdas devido aos usos a montante das turbinas, e aplicaria o mecanismo de cobrança dando um indicativo aos usuários do real valor econômico do recurso sendo utilizado.

Esses quadros contendo a contabilidade das transações podem ser feitos para cada mês dos três anos simulados, e indicam as compensações necessárias em cada nó do sistema e para cada usina, para aquele mês.

A cobrança pelo uso da água, instrumento de gestão preconizado na PNRH, já está em funcionamento em diversas bacias brasileiras. Embora a principal finalidade da cobrança atualmente seja a arrecadação financeira para investimentos em gestão de recursos hídricos ou financiamento de projetos nas bacias de origem, o instrumento possui duas outras funções, a de dar ao usuário uma indicação do real valor da água e incentivar o uso racional da água. Essas duas funções, em especial a primeira, são contempladas pelo instrumento proposto de Contabilidade Hídrica Dinâmica, que funcionaria através de valores dinâmicos na cobrança pelo uso da água, conforme os resultados obtidos no modelo de otimização. O mecanismo de cobrança varia de bacia para bacia, e suas diretrizes são propostas, deliberadas e aprovadas dentro do âmbito dos comitês de bacia, e conselhos de recursos hídricos, e pode ser adaptado para essa realidade específica, com valores dinâmicos.

4.3.2. Balanço das compensações na estrutura ALE

Para se ter uma visão de como se dariam os mecanismos de compensação ao longo de um período maior de tempo, foram alocadas as compensações dos três anos simulados com a estrutura ALE proposta, apresentados no Quadro 4.9, Quadro 4.10 e Quadro 4.11.

Quadro 4.9 - Balanços mensais da compensação financeira e estrutura ALE para o ano 02

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Nó	Compensação paga por cada nó usuário $C_{w,aloc}$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 356,94	R\$ 370,58	R\$ 538,56	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.266,09
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 182,69	R\$ 192,15	R\$ 224,22	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 599,07
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 608,26	R\$ 638,27	R\$ 701,28	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.947,81
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 463,61	R\$ 485,42	R\$ 679,17	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.628,20
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 291,17	R\$ 310,26	R\$ 422,25	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.023,67
9 - Exutório	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.902,68	R\$ 1.996,68	R\$ 2.565,49	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.464,84
Nó	Benefício econômico líquido de cada nó após o pagamento da compensação $B_{w,aloc}^L$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 3.501,21	R\$ 5.832,02	R\$ 5.408,70	R\$ 6.636,53	R\$ 3.067,32	R\$ 1.511,85	R\$ 1.985,91	R\$ 297,98	R\$ 0,00	R\$ 28.241,54
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.969,69	R\$ 3.406,02	R\$ 2.995,03	R\$ 4.431,50	R\$ 3.024,83	R\$ 1.757,42	R\$ 1.178,95	R\$ 133,13	R\$ 0,00	R\$ 18.896,58
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 5.830,10	R\$ 10.227,08	R\$ 9.080,62	R\$ 13.675,48	R\$ 10.511,62	R\$ 6.220,25	R\$ 3.984,22	R\$ 435,85	R\$ 0,00	R\$ 59.965,22
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.616,24	R\$ 10.862,73	R\$ 9.063,63	R\$ 12.473,77	R\$ 4.938,44	R\$ 2.305,53	R\$ 2.582,82	R\$ 390,22	R\$ 0,00	R\$ 49.233,38
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 5.660,78	R\$ 9.548,81	R\$ 8.483,05	R\$ 11.881,64	R\$ 6.597,07	R\$ 3.683,77	R\$ 5.543,42	R\$ 812,47	R\$ 0,00	R\$ 52.211,00
9 - Exutório	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 184,33	R\$ 362,79	R\$ 404,44	R\$ 551,24	R\$ 583,41	R\$ 378,33	R\$ 1.025,01	R\$ 161,91	R\$ 0,00	R\$ 3.661,01
Total	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 23.762,35	R\$ 40.239,45	R\$ 35.435,48	R\$ 49.650,17	R\$ 28.722,69	R\$ 15.857,15	R\$ 16.300,33	R\$ 2.231,57	R\$ 0,00	R\$ 212.208,74
Nó	Demanda total de cada nó w (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	7,30	11,01	12,47	10,45	7,80	5,81	2,72	0,44	0,00	58,02
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	3,74	5,71	5,19	9,87	9,39	5,08	1,40	0,20	0,00	40,58
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	12,45	18,96	16,24	32,11	33,64	17,72	4,67	0,65	0,00	136,45
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	9,49	14,42	15,73	22,95	16,66	10,34	3,55	0,58	0,00	93,73
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	8,35	12,88	13,59	23,58	17,68	10,22	7,50	1,21	0,00	95,02
9 - Exutório	0,18	0,02	0,00	0,41	0,98	1,01	1,65	1,28	0,70	1,95	0,37	0,00	8,56
Total	0,18	0,02	0,00	41,75	63,95	64,24	100,62	86,46	49,88	21,81	3,46	0,00	432,36
Nó	Demanda firme de cada nó w_{fir} (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	3,77	7,31	7,04	10,45	7,80	5,81	2,72	0,44	0,00	45,35
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	1,93	3,79	2,93	9,87	9,39	5,08	1,40	0,20	0,00	34,59
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	6,43	12,59	9,17	32,11	33,64	17,72	4,67	0,65	0,00	116,98
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	4,90	9,57	8,88	22,95	16,66	10,34	3,55	0,58	0,00	77,44
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	4,31	8,55	7,67	23,58	17,68	10,22	7,50	1,21	0,00	80,73
9 - Exutório	0,00	0,00	0,00	0,21	0,65	0,57	1,65	1,28	0,70	1,95	0,37	0,00	7,39
Total	0,00	0,00	0,00	21,56	42,45	36,26	100,62	86,46	49,88	21,81	3,46	0,00	362,49
Nó	Demanda alocável de cada nó w_{aloc} (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	3,53	3,70	5,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,67
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	1,81	1,92	2,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,99
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	6,02	6,37	7,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,47
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	4,59	4,85	6,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,29
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	4,04	4,33	5,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,29
9 - Exutório	0,18	0,02	0,00	0,20	0,33	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,17
Total	0,18	0,02	0,00	20,19	21,50	27,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,87
UHE	Compensação paga a cada UHE π_{aloc} (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 199,25	R\$ 380,66	R\$ 583,61	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.163,52
8 - Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.703,43	R\$ 1.616,02	R\$ 1.981,87	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 5.301,32
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.902,68	R\$ 1.996,68	R\$ 2.565,49	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.464,84
UHE	Varição do benefício econômico de cada UHE ω (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	-R\$ 552,04	-R\$ 415,79	-R\$ 321,98	-R\$ 221,31	-R\$ 485,17	-R\$ 796,21	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 746,62	-R\$ 3.539,11
8 - Serra do Facão	-R\$ 2.029,76	-R\$ 2.036,77	-R\$ 1.298,10	-R\$ 1.568,64	-R\$ 1.664,25	-R\$ 2.127,77	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 10.725,29
Total	-R\$ 2.581,80	-R\$ 2.452,56	-R\$ 1.620,08	-R\$ 1.789,95	-R\$ 2.149,41	-R\$ 2.923,99	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 746,62	-R\$ 14.264,40
UHE	Varição líquida do benefício econômico de cada UHE após o pagamento da compensação π_{aloc}^L (1.000 R\$)												
6 - Batalha	-R\$ 552,04	-R\$ 415,79	-R\$ 321,98	-R\$ 22,06	-R\$ 104,51	-R\$ 212,60	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 746,62	-R\$ 2.375,59
8 - Serra do Facão	-R\$ 2.029,76	-R\$ 2.036,77	-R\$ 1.298,10	R\$ 134,79	-R\$ 48,23	-R\$ 145,90	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 5.423,97
Total	-R\$ 2.581,80	-R\$ 2.452,56	-R\$ 1.620,08	R\$ 112,73	-R\$ 152,73	-R\$ 358,50	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 746,62	-R\$ 7.799,56

Quadro 4.10 - Balanços mensais da compensação financeira e estrutura ALE para o ano 03

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Nó	Compensação paga por cada nó usuário $C_{w,aloc}$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 593,21	R\$ 500,46	R\$ 867,24	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.960,90
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 303,62	R\$ 259,50	R\$ 225,14	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 788,25
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.010,88	R\$ 861,95	R\$ 704,14	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 2.576,97
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 770,48	R\$ 655,54	R\$ 681,94	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 2.107,96
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 506,80	R\$ 437,18	R\$ 437,38	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.381,36
9 - Exutório	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 3.184,98	R\$ 2.714,63	R\$ 2.915,85	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 8.815,45
Nó	Benefício econômico líquido de cada nó após o pagamento da compensação $B_{w,aloc}^L$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 3.264,95	R\$ 5.702,15	R\$ 4.915,76	R\$ 6.439,57	R\$ 3.127,13	R\$ 1.477,96	R\$ 1.985,91	R\$ 297,98	R\$ 0,00	R\$ 27.211,41
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.848,77	R\$ 3.338,68	R\$ 2.994,12	R\$ 4.431,50	R\$ 3.100,09	R\$ 1.757,42	R\$ 1.178,95	R\$ 133,13	R\$ 0,00	R\$ 18.782,66
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 5.427,49	R\$ 10.003,40	R\$ 9.077,76	R\$ 13.675,48	R\$ 10.511,62	R\$ 6.220,25	R\$ 3.984,22	R\$ 435,85	R\$ 0,00	R\$ 59.336,06
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.309,38	R\$ 10.692,60	R\$ 9.060,86	R\$ 12.012,91	R\$ 4.992,12	R\$ 2.305,53	R\$ 2.582,82	R\$ 390,22	R\$ 0,00	R\$ 48.346,43
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 5.445,14	R\$ 9.421,89	R\$ 8.467,91	R\$ 11.578,11	R\$ 6.906,08	R\$ 3.683,77	R\$ 5.543,42	R\$ 812,47	R\$ 0,00	R\$ 51.858,80
9 - Exutório	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 184,33	R\$ 362,79	R\$ 404,44	R\$ 551,24	R\$ 583,41	R\$ 378,33	R\$ 1.025,01	R\$ 161,91	R\$ 8,60	R\$ 3.669,61
Total	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 22.480,05	R\$ 39.521,51	R\$ 34.920,86	R\$ 48.688,82	R\$ 29.220,43	R\$ 15.823,25	R\$ 16.300,33	R\$ 2.231,57	R\$ 8,60	R\$ 209.204,96
Nó	Demanda total de cada nó w (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	7,30	11,01	11,27	9,31	8,01	5,56	2,72	0,44	0,00	55,63
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	3,74	5,71	5,19	9,87	9,94	5,08	1,40	0,20	0,00	41,13
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	12,45	18,96	16,24	32,11	33,64	17,72	4,67	0,65	0,00	136,45
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	9,49	14,42	15,73	19,57	17,06	10,34	3,55	0,58	0,00	90,74
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	8,35	12,88	13,59	21,35	19,95	10,22	7,50	1,21	0,00	95,06
9 - Exutório	0,18	0,02	0,00	0,41	0,98	1,01	1,65	1,28	0,70	1,95	0,37	0,18	8,74
Total	0,18	0,02	0,00	41,75	63,95	63,03	93,87	89,88	49,63	21,81	3,46	0,18	427,76
Nó	Demanda firme de cada nó w_{fir} (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	0,39	4,95	5,12	9,31	8,01	5,56	2,72	0,44	0,00	36,51
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	0,20	2,57	2,36	9,87	9,94	5,08	1,40	0,20	0,00	31,62
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	0,66	8,53	7,38	32,11	33,64	17,72	4,67	0,65	0,00	105,37
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	0,51	6,49	7,14	19,57	17,06	10,34	3,55	0,58	0,00	65,24
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	0,44	5,79	6,17	21,35	19,95	10,22	7,50	1,21	0,00	72,65
9 - Exutório	0,00	0,00	0,00	0,02	0,44	0,46	1,65	1,28	0,70	1,95	0,37	0,00	6,88
Total	0,00	0,00	0,00	2,22	28,78	28,62	93,87	89,88	49,63	21,81	3,46	0,00	318,27
Nó	Demanda alocável de cada nó w_{aloc} (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	6,92	6,06	6,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,12
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	3,54	3,14	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,51
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	11,78	10,43	8,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,08
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	8,98	7,93	8,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,50
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	7,91	7,08	7,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,41
9 - Exutório	0,18	0,02	0,00	0,39	0,54	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	1,86
Total	0,18	0,02	0,00	39,52	35,18	34,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	109,49
UHE	Compensação paga a cada UHE π_{aloc} (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 107,62	R\$ 316,10	R\$ 511,16	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 934,87
8 - Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 3.077,36	R\$ 2.398,53	R\$ 2.404,68	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 7.880,58
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 3.184,98	R\$ 2.714,63	R\$ 2.915,85	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 8.815,45
UHE	Variação do benefício econômico de cada UHE ω (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	-R\$ 1.106,03	-R\$ 304,31	R\$ 0,00	-R\$ 128,56	-R\$ 438,83	-R\$ 679,85	R\$ 420,66	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 2.236,92
8 - Serra do Facão	-R\$ 4.578,79	-R\$ 3.363,77	-R\$ 3.895,31	-R\$ 3.070,78	-R\$ 2.722,89	-R\$ 2.616,54	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 179,06	-R\$ 20.427,14
Total	-R\$ 5.684,83	-R\$ 3.668,07	-R\$ 3.895,31	-R\$ 3.199,34	-R\$ 3.161,72	-R\$ 3.296,39	R\$ 420,66	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 179,06	-R\$ 22.664,06
UHE	Variação líquida do benefício econômico de cada UHE após o pagamento da compensação π_{aloc}^L (1.000 R\$)												
6 - Batalha	-R\$ 1.106,03	-R\$ 304,31	R\$ 0,00	-R\$ 20,94	-R\$ 122,73	-R\$ 168,69	R\$ 420,66	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 1.302,04
8 - Serra do Facão	-R\$ 4.578,79	-R\$ 3.363,77	-R\$ 3.895,31	R\$ 6,58	-R\$ 324,36	-R\$ 211,86	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 179,06	-R\$ 12.546,57
Total	-R\$ 5.684,83	-R\$ 3.668,07	-R\$ 3.895,31	-R\$ 14,36	-R\$ 447,09	-R\$ 380,55	R\$ 420,66	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 179,06	-R\$ 13.848,61

Quadro 4.11 - Balanços mensais da compensação financeira e estrutura ALE para o ano 04

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Nó	Compensação paga por cada nó usuário $C_{w,aloc}$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 123,74	R\$ 230,96	R\$ 655,98	R\$ 644,74	R\$ 0,00	R\$ 716,83	R\$ 204,07	R\$ 29,89	R\$ 0,00	R\$ 2.606,22
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 63,34	R\$ 119,76	R\$ 145,81	R\$ 292,85	R\$ 0,00	R\$ 277,28	R\$ 105,14	R\$ 13,35	R\$ 0,00	R\$ 1.017,52
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 210,87	R\$ 397,79	R\$ 456,04	R\$ 952,85	R\$ 0,00	R\$ 967,52	R\$ 350,16	R\$ 43,72	R\$ 0,00	R\$ 3.378,95
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 160,72	R\$ 302,54	R\$ 441,66	R\$ 1.423,90	R\$ 0,00	R\$ 564,28	R\$ 266,38	R\$ 39,14	R\$ 0,00	R\$ 3.198,62
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 109,58	R\$ 208,16	R\$ 359,37	R\$ 574,30	R\$ 0,00	R\$ 421,71	R\$ 470,31	R\$ 64,79	R\$ 0,00	R\$ 2.208,22
9 - Exutório	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 668,26	R\$ 1.259,21	R\$ 2.058,87	R\$ 3.888,64	R\$ 0,00	R\$ 2.947,62	R\$ 1.396,05	R\$ 190,89	R\$ 0,00	R\$ 12.409,53
Nó	Benefício econômico líquido de cada nó após o pagamento da compensação $B_{w,aloc}^L$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 3.734,41	R\$ 5.971,64	R\$ 5.175,49	R\$ 5.896,49	R\$ 3.218,00	R\$ 784,75	R\$ 1.781,84	R\$ 268,10	R\$ 0,00	R\$ 26.830,72
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 2.089,05	R\$ 3.478,42	R\$ 3.073,44	R\$ 4.138,66	R\$ 3.134,65	R\$ 1.480,13	R\$ 1.073,81	R\$ 119,78	R\$ 0,00	R\$ 18.587,94
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.227,49	R\$ 10.467,56	R\$ 9.325,86	R\$ 12.722,64	R\$ 10.511,62	R\$ 5.252,72	R\$ 3.634,06	R\$ 392,13	R\$ 0,00	R\$ 58.534,08
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.919,13	R\$ 11.045,61	R\$ 9.301,14	R\$ 10.857,23	R\$ 5.192,49	R\$ 1.741,25	R\$ 2.316,44	R\$ 351,08	R\$ 0,00	R\$ 47.724,38
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 5.842,36	R\$ 9.650,90	R\$ 8.705,99	R\$ 11.332,84	R\$ 6.968,92	R\$ 3.262,07	R\$ 5.095,14	R\$ 747,68	R\$ 0,00	R\$ 51.605,90
9 - Exutório	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 184,33	R\$ 362,79	R\$ 404,44	R\$ 551,24	R\$ 583,41	R\$ 378,33	R\$ 1.025,01	R\$ 161,91	R\$ 0,00	R\$ 3.661,01
Total	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 24.996,76	R\$ 40.976,92	R\$ 35.986,36	R\$ 45.499,10	R\$ 29.609,09	R\$ 12.899,25	R\$ 14.926,31	R\$ 2.040,68	R\$ 0,00	R\$ 206.944,03
Nó	Demanda total de cada nó w (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	7,30	11,01	11,62	9,75	8,34	5,74	2,72	0,44	0,00	56,93
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	3,74	5,71	5,19	9,87	10,20	5,08	1,40	0,20	0,00	41,39
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	12,45	18,96	16,24	32,11	33,64	17,72	4,67	0,65	0,00	136,45
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	9,49	14,42	15,73	21,54	18,53	10,34	3,55	0,58	0,00	94,18
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	8,35	12,88	16,95	24,11	20,41	10,22	7,97	1,21	0,00	102,11
9 - Exutório	0,18	0,02	0,00	0,41	0,98	1,01	1,65	1,28	0,70	1,95	0,37	0,00	8,56
Total	0,18	0,02	0,00	41,75	63,95	66,75	99,04	92,39	49,80	22,27	3,46	0,00	439,62
Nó	Demanda firme de cada nó w_{fir} (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	5,66	7,74	6,68	5,15	8,34	0,61	0,00	0,00	0,00	34,18
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	2,90	4,01	2,99	5,21	10,20	0,54	0,00	0,00	0,00	25,84
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	9,64	13,33	9,34	16,95	33,64	1,90	0,00	0,00	0,00	84,80
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	7,35	10,14	9,04	11,37	18,53	1,11	0,00	0,00	0,00	57,53
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	6,47	9,05	9,75	12,73	20,41	1,09	0,00	0,00	0,00	59,50
9 - Exutório	0,00	0,00	0,00	0,32	0,69	0,58	0,87	1,28	0,07	0,00	0,00	0,00	3,82
Total	0,00	0,00	0,00	32,34	44,96	38,38	52,28	92,39	5,33	0,00	0,00	0,00	265,67
Nó	Demanda alocável de cada nó w_{aloc} (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	1,65	3,27	4,94	4,61	0,00	5,12	2,72	0,44	0,00	22,75
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	0,84	1,70	2,21	4,66	0,00	4,54	1,40	0,20	0,00	15,54
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	2,80	5,63	6,90	15,16	0,00	15,83	4,67	0,65	0,00	51,65
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	2,14	4,28	6,69	10,17	0,00	9,23	3,55	0,58	0,00	36,64
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	1,88	3,82	7,20	11,39	0,00	9,13	7,97	1,21	0,00	42,61
9 - Exutório	0,18	0,02	0,00	0,09	0,29	0,43	0,78	0,00	0,62	1,95	0,37	0,00	4,74
Total	0,18	0,02	0,00	9,41	19,00	28,37	46,77	0,00	44,47	22,27	3,46	0,00	173,94
UHE	Compensação paga a cada UHE π_{aloc} (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 202,21	R\$ 651,72	R\$ 943,90	R\$ 1.885,09	R\$ 0,00	R\$ 2.525,92	R\$ 925,74	R\$ 5,76	R\$ 0,00	R\$ 7.140,34
8 - Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 466,06	R\$ 607,49	R\$ 1.114,96	R\$ 2.003,55	R\$ 0,00	R\$ 421,71	R\$ 470,31	R\$ 185,12	R\$ 0,00	R\$ 5.269,20
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 668,26	R\$ 1.259,21	R\$ 2.058,87	R\$ 3.888,64	R\$ 0,00	R\$ 2.947,62	R\$ 1.396,05	R\$ 190,89	R\$ 0,00	R\$ 12.409,53
UHE	Variação do benefício econômico de cada UHE ω (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	-R\$ 3.449,19	-R\$ 1.539,06	-R\$ 683,74	-R\$ 385,73	-R\$ 776,00	-R\$ 1.138,63	-R\$ 1.362,46	R\$ 0,00	-R\$ 1.127,74	-R\$ 829,62	-R\$ 636,58	-R\$ 1.358,96	-R\$ 13.287,71
8 - Serra do Facão	-R\$ 1.093,89	-R\$ 789,84	-R\$ 1.028,21	-R\$ 680,01	-R\$ 475,49	-R\$ 911,47	-R\$ 1.033,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 13.291,02	-R\$ 9,72	-R\$ 19.312,66
Total	-R\$ 4.543,08	-R\$ 2.328,90	-R\$ 1.711,95	-R\$ 1.065,75	-R\$ 1.251,49	-R\$ 2.050,10	-R\$ 2.395,46	R\$ 0,00	-R\$ 1.127,74	-R\$ 829,62	-R\$ 13.927,60	-R\$ 1.368,68	-R\$ 32.600,36
UHE	Variação líquida do benefício econômico de cada UHE após o pagamento da compensação π_{aloc}^L (1.000 R\$)												
6 - Batalha	-R\$ 3.449,19	-R\$ 1.539,06	-R\$ 683,74	-R\$ 183,53	-R\$ 124,29	-R\$ 194,73	R\$ 522,63	R\$ 0,00	R\$ 1.398,17	R\$ 96,13	-R\$ 630,81	-R\$ 1.358,96	-R\$ 6.147,37
8 - Serra do Facão	-R\$ 1.093,89	-R\$ 789,84	-R\$ 1.028,21	-R\$ 213,96	R\$ 132,01	R\$ 203,49	R\$ 970,55	R\$ 0,00	R\$ 421,71	R\$ 470,31	-R\$ 13.105,90	-R\$ 9,72	-R\$ 14.043,46
Total	-R\$ 4.543,08	-R\$ 2.328,90	-R\$ 1.711,95	-R\$ 397,48	R\$ 7,72	R\$ 8,76	R\$ 1.493,18	R\$ 0,00	R\$ 1.819,88	R\$ 566,43	-R\$ 13.736,71	-R\$ 1.368,68	-R\$ 20.190,83

No Quadro 4.12 é apresentado o resumo anual dos balanços gerados na ALE.

Quadro 4.12 - Balanços anuais da compensação

Ano	$C_{w,aloc}$ (R\$ 1.000)	$B_{w,aloc}^L$ (R\$ 1.000)	w (hm ³)	w_{fir} (hm ³)	w_{aloc} (hm ³)	π_{aloc} (R\$ 1.000)	ω (R\$ 1.000)	π_{aloc}^L (1.000 R\$)
Ano 02	R\$ 6.464,84	R\$ 212.208,74	432,36	362,49	69,87	R\$ 6.464,84	-R\$ 14.264,40	-R\$ 7.799,56
Ano 03	R\$ 8.815,45	R\$ 209.204,96	427,76	318,27	109,49	R\$ 8.815,45	-R\$ 22.664,06	-R\$ 13.848,61
Ano 04	R\$ 12.409,53	R\$ 206.944,03	439,62	265,67	173,94	R\$ 12.409,53	-R\$ 32.600,36	-R\$ 20.190,83

Observa-se que o mecanismo é suficiente para abater apenas parte da redução de benefício das usinas hidrelétricas, pelo fato de apenas parte da demanda estar sendo alocada. Existem duas formas de reduzir completamente este valor: variando a parcela alocável, ou variando o valor unitário cobrado/pago na compensação.

4.3.3. Correção dos balanços das compensações na estrutura ALE

Analisando o Ano 04, observa-se que a variação de benefício econômico (ω) total é de -R\$ 32,6 milhões, dos quais a compensação abateu R\$ 12,41 milhões, deixando um déficit de -R\$ 20,2 milhões. No Quadro 4.13 estão apresentados alguns valores globais para o Ano 04.

Quadro 4.13 - Valores globais das transações para o Ano 04

Variável	Ano 04
Demanda total - w (hm ³)	439,62
Demanda alocável - w_{aloc} (hm ³)	169,20
Compensação paga - π_{aloc} (R\$ 1.000)	R\$ 12.409,53
Valor unitário médio efetivo cobrado - λ (R\$/1.000m ³)	R\$ 73,34
Variação do benefício da geração de energia - ω (R\$ 1.000)	-R\$ 32.600,36
Valor unitário médio corrigido para cobrir a variação total de ω - λ_{corr} (R\$/1.000m ³)	R\$ 192,68
Demanda alocável corrigida para cobrir a variação total de ω - $w_{aloc,corr}$ (hm ³)	444,48

O quadro mostra a demanda total w , a demanda alocável w_{aloc} , o valor total da compensação pago pela agricultura, e recebido pelo setor elétrico π_{aloc} , o valor unitário médio cobrado pela água (w_{aloc}/π_{aloc}), a variação do benefício econômico do setor elétrico ω , e os valores necessários para cobrir toda a variação ω caso (i) se ajustasse o valor unitário da água, ou (ii) se ajustasse a parcela alocável de água.

Variando a parcela alocável, seria necessário um valor de 444,5 hm³ para atingir o valor de ω , que é aproximadamente a demanda total w . Isso é esperado, visto que ω representa a variação de benefício gerado pelo setor entre os arranjos com e sem agricultura irrigada. Como observado no item 3.3.1. Dados de saída do modelo hidroeconômico, o déficit no setor energético é aproximadamente igual à demanda total do setor agrícola, visto que o modelo aloca água do setor elétrico ao agrícola na mudança dos arranjos. Ou seja, para cobrir a variação total do setor elétrico, ao preço unitário igual ao valor marginal, seria necessário alocar toda a demanda (firme + alocável) utilizada pelo setor agrícola.

É necessário ressaltar, também, que o setor elétrico é pago pela parcela firme da energia independente de gera-la ou não, pois o valor está previsto no contrato e é independente do efetivo fornecimento daquele montante de energia ao sistema. A redução da energia gerada, no entanto, impede a usina de conseguir transacionar as quotas excedentes da energia no mercado (ou impõe à

mesma a necessidade de comprar energia adicional no mercado de curto prazo), aos preços do PLD, maiores que o preço da energia firme, o que gera um prejuízo às UHEs.

Este não é o objetivo desta proposta, no entanto, que visa encontrar uma solução intermediária para o conflito, buscando compensar em parte os usuários através de um mecanismo de incentivos econômicos, sem inviabilizar as atividades de nenhum deles. Logo, a correção se dará no valor unitário cobrado, que no balanço das compensações apresentado, foi igual ao valor marginal da água λ em cada mês em cada nó do sistema.

Alguns ajustes nos valores unitários cobrados pela água podem cobrir toda a variação suportada pelo setor elétrico, principalmente focando a variação nos meses onde o impacto (no setor elétrico) é maior.

O Quadro 4.14 apresenta o balanço das compensações da estrutura ALE corrigido para cobrir toda a variação de benefício econômico do setor elétrico, em cada UHE, no Ano 04.

Quadro 4.14 - Balanço da estrutura ALE corrigido para o Ano 04

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual/média*
Nó	Demanda alocável de cada nó w_{aloc} (hm³)												
1 - Rio Samambaia	0,00	0,00	0,00	1,65	3,27	4,94	4,61	0,00	5,12	2,72	0,44	0,00	22,75
2 - São Marcos Montante	0,00	0,00	0,00	0,84	1,70	2,21	4,66	0,00	4,54	1,40	0,20	0,00	15,54
12 - Irrigação Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	2,80	5,63	6,90	15,16	0,00	15,83	4,67	0,65	0,00	51,65
10 - Consumo Batalha	0,00	0,00	0,00	2,14	4,28	6,69	10,17	0,00	9,23	3,55	0,58	0,00	36,64
11 - Consumo Serra do Facão	0,00	0,00	0,00	1,88	3,82	7,20	11,39	0,00	9,13	7,97	1,21	0,00	42,61
9 - Exutório	0,18	0,02	0,00	0,09	0,29	0,43	0,78	0,00	0,62	1,95	0,37	0,00	4,74
Total	0,18	0,02	0,00	9,41	19,00	28,37	46,77	0,00	44,47	22,27	3,46	0,00	173,94
UHE	Varição do benefício econômico de cada UHE ω (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	-R\$ 3.449,19	-R\$ 1.539,06	-R\$ 683,74	-R\$ 385,73	-R\$ 776,00	-R\$ 1.138,63	-R\$ 1.362,46	R\$ 0,00	-R\$ 1.127,74	-R\$ 829,62	-R\$ 636,58	-R\$ 1.358,96	-R\$ 13.287,71
8 - Serra do Facão	-R\$ 1.093,89	-R\$ 789,84	-R\$ 1.028,21	-R\$ 680,01	-R\$ 475,49	-R\$ 911,47	-R\$ 1.033,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	-R\$ 13.291,02	-R\$ 9,72	-R\$ 19.312,66
Total	-R\$ 4.543,08	-R\$ 2.328,90	-R\$ 1.711,95	-R\$ 1.065,75	-R\$ 1.251,49	-R\$ 2.050,10	-R\$ 2.395,46	R\$ 0,00	-R\$ 1.127,74	-R\$ 829,62	-R\$ 13.927,60	-R\$ 1.368,68	-R\$ 32.600,36
Nó	Valor marginal da água λ (R\$/1000m³)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 87,66	R\$ 84,34	R\$ 79,46	R\$ 75,18	R\$ 70,63	R\$ 132,79	R\$ 140,01	R\$ 285,84	R\$ 139,91	R\$ 74,96	R\$ 67,22	R\$ 72,55	R\$ 114,55
2 - São Marcos Montante	R\$ 87,66	R\$ 84,34	R\$ 79,46	R\$ 75,18	R\$ 70,63	R\$ 66,06	R\$ 62,83	R\$ 61,84	R\$ 61,13	R\$ 74,96	R\$ 67,22	R\$ 72,55	R\$ 65,47
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 87,66	R\$ 84,34	R\$ 79,46	R\$ 75,18	R\$ 70,63	R\$ 66,06	R\$ 62,83	R\$ 61,84	R\$ 61,13	R\$ 74,96	R\$ 67,22	R\$ 72,55	R\$ 65,42
10 - Consumo Batalha	R\$ 87,66	R\$ 84,34	R\$ 79,46	R\$ 75,18	R\$ 70,63	R\$ 66,06	R\$ 140,01	R\$ 139,95	R\$ 61,13	R\$ 74,96	R\$ 67,22	R\$ 72,55	R\$ 87,29
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 66,19	R\$ 64,30	R\$ 61,31	R\$ 58,23	R\$ 54,42	R\$ 49,88	R\$ 50,43	R\$ 139,01	R\$ 46,19	R\$ 59,03	R\$ 53,45	R\$ 58,52	R\$ 51,83
9 - Exutório	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Nó	Valor unitário cobrado após correção do balanço λ_{corr} (R\$/1000m³)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 39,99	R\$ 80,03	R\$ 124,40	R\$ 115,12	R\$ 0,00	R\$ 120,79	R\$ 65,20	R\$ 10,73	R\$ 0,00	R\$ 99,92
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 20,35	R\$ 41,03	R\$ 53,67	R\$ 116,62	R\$ 0,00	R\$ 107,44	R\$ 33,74	R\$ 4,79	R\$ 0,00	R\$ 82,63
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 69,19	R\$ 141,98	R\$ 180,96	R\$ 472,05	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 110,53	R\$ 15,70	R\$ 0,00	R\$ 192,21
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 52,23	R\$ 105,98	R\$ 174,37	R\$ 289,74	R\$ 0,00	R\$ 206,73	R\$ 84,74	R\$ 14,05	R\$ 0,00	R\$ 188,18
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 46,19	R\$ 99,16	R\$ 220,27	R\$ 458,68	R\$ 0,00	R\$ 314,93	R\$ 255,11	R\$ 29,44	R\$ 0,00	R\$ 286,79
9 - Exutório	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Nó	Compensação paga por cada nó usuário após correção do balanço $C_{w,aloc,corr}$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 65,82	R\$ 261,70	R\$ 614,55	R\$ 530,13	R\$ 0,00	R\$ 618,87	R\$ 177,49	R\$ 4,77	R\$ 0,00	R\$ 2.273,33
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 17,14	R\$ 69,57	R\$ 118,45	R\$ 543,51	R\$ 0,00	R\$ 487,32	R\$ 47,33	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 1.284,26
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 194,07	R\$ 799,67	R\$ 1.249,14	R\$ 7.158,63	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 516,32	R\$ 10,21	R\$ 0,00	R\$ 9.928,05
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 111,65	R\$ 453,94	R\$ 1.165,74	R\$ 2.946,74	R\$ 0,00	R\$ 1.908,13	R\$ 301,13	R\$ 8,18	R\$ 0,00	R\$ 6.895,52
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 86,92	R\$ 379,25	R\$ 1.586,85	R\$ 5.223,04	R\$ 0,00	R\$ 2.874,97	R\$ 2.032,47	R\$ 35,69	R\$ 0,00	R\$ 12.219,19
9 - Exutório	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 475,61	R\$ 1.964,13	R\$ 4.734,72	R\$ 16.402,07	R\$ 0,00	R\$ 5.889,29	R\$ 3.074,74	R\$ 59,80	R\$ 0,00	R\$ 32.600,36
UHE	Compensação paga a cada UHE após correção do balanço $\pi_{aloc,corr}$ (R\$ 1.000)												
6 - Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 140,68	R\$ 982,73	R\$ 1.748,33	R\$ 6.358,27	R\$ 0,00	R\$ 3.014,32	R\$ 1.042,27	R\$ 1,10	R\$ 0,00	R\$ 13.287,71
8 - Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 334,93	R\$ 981,40	R\$ 2.986,39	R\$ 10.043,79	R\$ 0,00	R\$ 2.874,97	R\$ 2.032,47	R\$ 58,70	R\$ 0,00	R\$ 19.312,66
Total	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 475,61	R\$ 1.964,13	R\$ 4.734,72	R\$ 16.402,07	R\$ 0,00	R\$ 5.889,29	R\$ 3.074,74	R\$ 59,80	R\$ 0,00	R\$ 32.600,36
UHE	Varição líquida do benefício econômico de cada UHE após o pagamento da compensação corrigida $\pi^L_{aloc,corr}$ (1.000 R\$)												
6 - Batalha	-R\$ 3.449,19	-R\$ 1.539,06	-R\$ 683,74	-R\$ 245,05	R\$ 206,72	R\$ 609,71	R\$ 4.995,81	R\$ 0,00	R\$ 1.886,58	R\$ 212,65	-R\$ 635,47	-R\$ 1.358,96	R\$ 0,00
8 - Serra do Facão	-R\$ 1.093,89	-R\$ 789,84	-R\$ 1.028,21	-R\$ 345,08	R\$ 505,92	R\$ 2.074,92	R\$ 9.010,80	R\$ 0,00	R\$ 2.874,97	R\$ 2.032,47	-R\$ 13.232,32	-R\$ 9,72	R\$ 0,00
Total	-R\$ 4.543,08	-R\$ 2.328,90	-R\$ 1.711,95	-R\$ 590,14	R\$ 712,64	R\$ 2.684,62	R\$ 14.006,61	R\$ 0,00	R\$ 4.761,55	R\$ 2.245,12	-R\$ 13.867,80	-R\$ 1.368,68	R\$ 0,00
Nó	Benefício econômico líquido de cada nó após o pagamento da compensação corrigida $B^L_{w,aloc,corr}$ (R\$ 1.000)												
1 - Rio Samambaia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 3.792,33	R\$ 5.940,91	R\$ 5.216,92	R\$ 6.011,09	R\$ 3.218,00	R\$ 882,71	R\$ 1.808,42	R\$ 293,21	R\$ 0,00	R\$ 27.163,61
2 - São Marcos Montante	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 2.135,24	R\$ 3.528,61	R\$ 3.100,81	R\$ 3.887,99	R\$ 3.134,65	R\$ 1.270,10	R\$ 1.131,62	R\$ 132,18	R\$ 0,00	R\$ 18.321,20
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.244,29	R\$ 10.065,68	R\$ 8.532,76	R\$ 6.516,85	R\$ 10.511,62	R\$ 6.220,25	R\$ 3.467,89	R\$ 425,63	R\$ 0,00	R\$ 51.984,98
10 - Consumo Batalha	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 6.968,20	R\$ 10.894,20	R\$ 8.577,06	R\$ 9.334,39	R\$ 5.192,49	R\$ 397,40	R\$ 2.281,69	R\$ 382,04	R\$ 0,00	R\$ 44.027,48
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 5.865,02	R\$ 9.479,81	R\$ 7.478,51	R\$ 6.684,10	R\$ 6.968,92	R\$ 808,80	R\$ 3.532,98	R\$ 776,78	R\$ 0,00	R\$ 41.594,93
9 - Exutório	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 184,33	R\$ 362,79	R\$ 404,44	R\$ 551,24	R\$ 583,41	R\$ 378,33	R\$ 1.025,01	R\$ 161,91	R\$ 0,00	R\$ 3.661,01
Total	R\$ 8,60	R\$ 0,95	R\$ 0,00	R\$ 25.189,42	R\$ 40.272,00	R\$ 33.310,51	R\$ 32.985,68	R\$ 29.609,09	R\$ 9.957,59	R\$ 13.247,62	R\$ 2.171,76	R\$ 0,00	R\$ 186.753,20

*Para os valores marginais/unitários foi calculada a média ponderada

A correção foi feita nos valores unitários cobrados pela demanda alocável. Foram apresentados os valores originais de valor marginal λ , e os novos valores unitários cobrados, corrigidos λ_{corr} . A variável $C_{w,aloc,corr}$ mostra o novo valor pago por cada nó, e a variável $\pi_{aloc,corr}$ o novo valor recebido por cada UHE. As duas últimas variáveis apresentadas, $\pi_{aloc,corr}^L$ e $B_{w,aloc,corr}^L$ mostram os valores líquidos corrigidos de cada setor, após as compensações.

No Quadro 4.15 estão apresentadas as mudanças nos valores unitários médios ponderados em cada nó, para o Ano 04.

Quadro 4.15 - Valores marginais e valores unitários após correção

Nó	Valor marginal da água λ (R\$/1000m ³)	Valor unitário cobrado após correção do balanço λ_{corr} (R\$/1000m ³)
1 - Rio Samambaia	R\$ 114,55	R\$ 99,92
2 - São Marcos Montante	R\$ 65,47	R\$ 82,63
12 - Irrigação Minas Gerais	R\$ 65,42	R\$ 192,21
10 - Consumo Batalha	R\$ 87,29	R\$ 188,18
11 - Consumo Serra do Facão	R\$ 51,83	R\$ 286,79
9 - Exutório	R\$ 0,00	R\$ 0,00

Observa-se que o setor agrícola, mesmo com o incremento dos valores marginais, continua com um benefício líquido positivo em todos os meses, após o pagamento da compensação. Isso demonstra a capacidade deste setor de pagar pelo uso da água, dado o seu alto valor agregado.

Faz-se a ressalva, aqui, que a correção dos valores unitários faz com quem o valor marginal como indicador da escassez seja distorcido, e os valores cobrados não sejam mais indicadores diretos da escassez no espaço e no tempo, ou do custo de oportunidade marginal. Por exemplo, o Nó 11, que possui o menor valor marginal (depois do exutório), por estar a jusante de Batalha, teve uma correção para o maior valor unitário da cobrança, devido a um mês específico onde o déficit na UHE Serra do Facão era elevado. Ainda assim, mantendo-se a ordem de grandeza dos valores unitários cobrados, entende-se que o objetivo de sinalizar a escassez se mantém.

No Quadro 4.16 estão apresentados os valores unitários cobrados, a variação de benefício econômico no setor elétrico e o benefício líquido do setor agrícola, para o arranjo econômico (sem compensações), para o balanço de compensação utilizando o valor marginal da água, e para a compensação corrigida para cobrir toda a variação do setor elétrico).

Quadro 4.16 - Saldos econômicos finais para o Ano 04

Variável	Arranjo energético	Arranjo econômico	Compensação	Compensação corrigida
Valor unitário médio pago pela água (R\$/1.000m ³)	R\$0,00	R\$0,00	R\$73,34	R\$192,68
Benefício líquido do setor elétrico (R\$ 1.000)	R\$397.272,00	R\$364.671,64	R\$377.081,17	R\$397.272,00
Varição de benefício do setor elétrico (R\$ 1.000)	R\$0,00	-R\$32.600,36	-R\$20.190,83	R\$0,00
Benefício líquido do setor agrícola (R\$ 1.000)	R\$0,00	R\$219.353,57	R\$206.944,03	R\$186.753,20
Benefícios totais do sistema (R\$ 1.000)	R\$397.272,00	R\$584.025,20	R\$584.025,20	R\$584.025,20

Com a compensação corrigida, é possível manter o aumento nos benefícios econômicos totais do sistema advindos da inclusão do setor agrícola, e mesmo assim anular a redução de benefício suportada pelo setor elétrico,

Esses modelos de transações demonstram que os sistemas de compensação financeira pelo uso da água não se tratam de um jogo de soma zero, onde um usuário necessariamente precisa perder para que outro ganhe. Existe a possibilidade de alocações negociadas, com compensações e cobrança, que resultam em soluções melhores do que a situação atual, onde não existem compensações e o uso da água a montante pela agricultura irrigada já produz impactos na vazão firme das usinas.

Não se pretende, com o proposto aqui, solucionar o problema de risco déficit do energia com potencialidades para ocorrer em um futuro próximo: o sistema de alocação aqui proposto não garante que haverá incremento na geração de energia, a menos que os usuários agrícolas optem por não utilizar suas parcelas de demanda alocável, para não ter que pagar seu preço marginal - situação que encontra pouco respaldo em um comportamento economicamente eficiente, visto que o usuário continua com um benefício superior ao custo marginal de oportunidade da quota alocável. O modelo proposto apenas oferece alternativas de negociação entre os usuários, para minimizar os prejuízos gerados pela falta de planejamento e ausência de um controle maior na liberação das permissões de direitos de uso da água.

4.4. Conclusões

Este trabalho consistiu em mostrar a utilidade de informações sobre *trade-offs* econômicos na resolução de conflitos envolvendo alocação da água entre usos competitivos, como é o exemplo da bacia do rio São Marcos. Além desse aspecto, o trabalho também mostra como informação sobre o valor econômico da água pode ser empregada em um instrumento dinâmico de alocação negociada, que poderia ser aplicado em contextos gerais onde há conflitos entre usos econômicos. Um instrumento nos moldes do aqui proposto tem a vantagem de trazer mais alternativas, complementando as abordagens tradicionais de comando-e-controle usualmente utilizadas.

Em relação ao contexto específico do conflito na bacia do Rio São Marcos, é possível concluir que existe uma solução de alocação negociada mediante cobrança e compensações econômicas que é melhor (sob a perspectiva da eficiência econômica) se comparada às soluções já propostas.

Conforme o exposto na NT nº 104/2020 (ANA, 2010b), foram propostas duas possíveis soluções, através de metodologias de comando-e-controle, para o conflito na bacia do rio São Marcos:

- a) Reduzir, através de campanhas de repressão aos pivôs irregulares, marcos regulatórios com os estados e outros instrumentos de restrição, o consumo a montante da UHE, até que este seja igual ao previsto na DRDH. Isto implicaria em proibir o funcionamento de mais de 45.000 hectares de pivô central, com evidentes consequências para a economia de Cristalina, Paracatu, Unaí e do DF;
- b) Revisar a DRDH de forma a ampliar a vazão reservada para usos consuntivos, com possível reavaliação, por parte da ANEEL, de aspectos energéticos

Qualquer uma das duas soluções mencionadas importaria um grande prejuízo ao setor. O próprio documento da ANA ressalta uma preferência pela alternativa (b), desde que viesse acompanhada de

restrições ao crescimento dos usos agrícolas na bacia, no entanto, isso resultaria em prejuízos econômicos de até R\$ 100 milhões anuais para esse setor. Considerando que os valores de energia firme foram negociados em leilões e outorgados a essas usinas, que dimensionaram as estruturas hidráulicas e energéticas conforme essa expectativa, eventuais reduções nas vazões disponíveis ocasionadas pelo uso da agricultura irrigada não inicialmente previsto iriam resultar em perdas para o setor energético.

Em contrapartida, a opção (a), que segundo uma visão mais legalista do problema pode se mostrar a medida mais adequada, visto que uma parte dos pivôs da região são irregulares, traria consequências econômicas e sociais drásticas à região. Além do impacto econômico direto resultante da repressão aos pivôs irregulares, soma-se ao fato do PIB agropecuário dos municípios ser parte considerável da atividade econômica dos mesmos, e uma redução na atividade agrícola traria elevados prejuízos ao município como um todo, bem como a toda cadeia produtiva que depende do setor.

As tradicionais abordagens de comando-e-controle tem se mostrado ineficazes na solução de problemas alocativos e na busca de uma maior eficiência de uso da água. Uma alternativa baseada em informações dos *trade-offs* econômicos, aqui produzidas com o emprego de modelos hidroeconômicos de otimização, pode gerar resultados que oferecem alguma contrapartida a todos os usuários do sistema, no lugar das tradicionais regulações de caráter mais inflexível. Essa contrapartida se mostra mais adequada para os atuais e complexos sistemas sociohidroeconômicos.

A solução proposta apresenta benefícios para ambos os usuários do sistema, tanto para o setor hidrelétrico, que será compensado em valor maior do que o seu prejuízo, alternativa preferível à atual conjuntura, quanto para o setor agrícola, visto que a alternativa, dita legalista, seria a de repressão aos pivôs irregulares. Considerando, ainda, que a cobrança pelo uso da água já é um instrumento consolidado e em franca ampliação de sua aplicação, é natural que os diferentes setores usuários venham a pagar pelo uso dos recursos hídricos, de uma maneira ou de outra. O quadro institucional aqui proposto combina instrumentos já existentes - a alocação negociada e a cobrança pelo uso dos recursos hídricos - em uma solução mais eficiente.

5. LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A presente seção discute as limitações do presente trabalho, bem como algumas medidas adotadas para sua mitigação.

Os dados de entrada utilizados estão sujeitos a erros e, principalmente, são bastante dinâmicos; em especial os valores relacionados a preços de mercado - da eletricidade e dos produtos agrícolas - e custos de produção tem variações acentuadas dependendo da época e do local. O demonstrado nesse trabalho e os valores resultantes e utilizados na ALE são válidos para as determinadas condições explicitadas, porém, caso sejam aplicados a outras bacias, ou em um período futuro, devem ser recalibrados no modelo.

O modelo não trata das externalidades geradas pelas atividades dos setores, como geração de empregos, movimentação da cadeia produtiva, necessidades socioeconômicas da região em relação à geração de energia e produção de alimentos. Algumas dessas externalidades podem ser percebidas como *efeitos multiplicadores* em mercados secundários a partir de investimentos na produção. Entretanto, alguns autores, a exemplo de Young & Loomis (2014) ponderam que qualquer expansão em setores secundários em uma região acaba por ser compensada a longo prazo por reduções em atividades e lucros em outras regiões. Para Young & Loomis (2014), sob um contexto mais amplo de planejamento de investimento público em projetos, o efeito multiplicador do investimento em um projeto de recursos hídricos em uma região tende a ser compensado pelos efeitos multiplicadores das alternativas desse projeto em outras regiões, que deixaram de receber o investimento. Além disso, conforme mencionado no item 3.3.1.1.1, que apresentou a potência gerada na simulação, o modelo não garante os valores mínimos gerados de energia firme que a UHE deve fornecer para o sistema, independente do preço. Isso causa alguma distorção, visto que o objetivo do modelo é maximizar o benefício econômico, o que gera o efeito de reservar água para turbinar durante os meses onde o preço da energia é maior.

A geração de energia, por se tratar de um uso (largamente) não consuntivo, possui a característica de agregar uma maior produção conforme novas unidades geradoras de energia vão sendo implementadas a jusante do curso hídrico. Embora o sistema aqui modelado inclua apenas a bacia do rio São Marcos, a cascata de unidades geradoras hidrelétricas se estende até Itaipu, no rio Paraná. Isso faz com que a quantidade de energia que 1 m³/s de água possa produzir seja maior do que aquela isoladamente observada no rio São Marcos. Para mitigar essa limitação, foi adotado como valor da energia no modelo o PLD, que reflete o valor marginal de 1 MWh adicional em todo o sistema integrado hidrotérmico Brasileiro. Um outro aspecto que se relaciona com compensações financeiras a nível isolado e local encontra respaldo em uma profunda discussão que ocorre no meio econômico a respeito das externalidades. As atividades produtivas geram externalidades a diversos outros indivíduos ou instituições: a poluição causada pela utilização de pesticidas agrícolas, a infiltração gerada pela irrigação, que pode contribuir para o escoamento de base a jusante, emissões de gases de efeito estufa gerados nos reservatórios superficiais, a reserva hídrica armazenada, que pode ser essencial para garantir o abastecimento ou mesmo uma vazão ecológica em momentos de escassez.

Esses são alguns exemplos de externalidades positivas ou negativas que perpassam os limites da bacia.

Ao simular um sistema real em um modelo, é necessário escolher quais das características e comportamentos do sistema serão incorporados na simulação, e faz parte dessa escolha a simplificação de diversos desses processos. Partindo da visão de que a bacia hidrográfica é uma unidade de planejamento, e se balizando na utilização de um mecanismo de compensação financeira que funcione a nível local, onde possa ser observado de forma mais clara o destino e origem das externalidades, e buscando uma metodologia mais simples e pragmática para a solução deste problema, optou-se por considerar apenas as usinas hidrelétricas localizadas dentro da bacia do rio São Marcos.

Em relação ao procedimento metodológico utilizado para obtenção e comparação do valor econômico da água nos diferentes setores de uso da bacia - tanto de seus valores absolutos como marginais - destaca-se que se trata de um modelo hidroeconômico estocástico com diversos exemplos de sua aplicação na literatura, já consolidado em estudos semelhantes.

Como referência para estudos futuros, propõe-se a consideração da estocasticidade nos preços de mercado de energia elétrica e das culturas agrícolas, e a inclusão de curvas de demanda para a agricultura em relação ao preço.

A estocasticidade da chuva e/ou da evapotranspiração como dados de entrada do modelo, permitindo incluir nos resultados o efeito das incertezas desses valores.

Além disso, podem ser incluídas restrições para garantias mínimas de energia ao simular a operação dos reservatórios hidrelétricos, para evitar meses sem geração de energia, e incluir as reservas de pequeno porte do sistema, que geram benefícios de regularização.

Por fim, recomenda-se realizar simulações com mais de cinco anos, visando evitar os efeitos da miopia e observar variações de longo prazo na operação do sistema, principalmente se aliado com variações de preço ao longo desta operação.

6. CONCLUSÃO GERAL

Instrumentos econômicos de gestão desenvolvidos a partir de informações como as aqui produzidas podem ser úteis na resolução de conflitos e proposição de soluções alocativas mais eficientes dos recursos hídricos. A evolução mundial do panorama da gestão já caminha para a utilização desses mecanismos, tanto no campo teórico quanto no legal-institucional, como é possível observar nas conclusões de diversas conferências e encontros internacionais tratando de recursos hídricos, e nos diferentes exemplos de locais que passaram a incorporar esses instrumentos aos seus modelos de gestão.

Os resultados indicam que os *trade-offs* são significativos e que o valor econômico da água varia no tempo e no espaço. Mais importante, simulações das opções de negociação a partir da contabilidade hídrica e do valor econômico da água mostraram que existem soluções com a possibilidade de compensação econômica de perdas entre os setores envolvidos. Essas soluções seriam o ponto de partida para um processo de alocação negociada capaz de dois pontos relevantes: (a) contribuir para desarmar uma situação de conflito entre usos onde os investimentos tanto na geração quanto na produção agrícola já foram feitos e não há água suficiente (b) sinalizar aos usuários atuais e futuros a localização espacial e o padrão de demanda que pode ser acomodado na bacia, em função do valor econômico da água.

Os resultados também indicam variabilidade nos benefícios econômicos, valores de cobrança e compensações calculadas, na forma das suas respectivas probabilidades de excedência. A variabilidade nesses valores reflete a própria variabilidade hidrológica na bacia (combinada com as operações de uso e armazenamento da água) e pode ser empregada para melhor conhecimento dos riscos associados às decisões tomadas a partir da alocação negociada. Esse é um aspecto ainda pouco explorado pela gestão dos recursos hídricos no Brasil, mas que contribui para dar mais transparência no processo de informação às partes envolvidas no processo de negociação. Conhecendo a probabilidade de se disponibilizar uma dada quantidade de água para realocação, bem como de quanto iria custar em compensações, permite um melhor planejamento por parte dos envolvidos.

O instrumento aqui apresentado pode ser muito útil para a resolução de conflitos pelo uso da água, e para desenvolver o paradigma da gestão e alocação dos recursos hídricos em um sentido que reconheça os benefícios e valores econômicos deste recurso, permitindo dessa forma a tomada de decisão, tanto da parte dos usuários, quanto dos órgãos gestores de recursos hídricos de forma mais embasada e controlada, entendendo os custos e benefícios das decisões de alocação. O entendimento de que as crises hídricas são crises de gestão demanda que sejam criados novos instrumentos, alternativos aos atuais modelos tradicionais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, I. M. DE; PINHEIRO, J. C. V. Aspectos Econômicos e Legais do Modelo de GEstão das Águas na Região do Cariri-CE. **Repositório da Universidade Federal do Ceará do Ceará**, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de Construção da Base Hidrográfica Ottocodificada da ANA: fase 1 – construção da base topológica de hidrografia e ottobacias conforme a codificação de bacias hidrográficas de Otto Pfafstetter : versão 2.0 de 1/11/2007**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas (ANA), 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Nota Técnica nº 103/GEREG/SOF-ANA - Considerações sobre valor econômico da água na bacia do rio São Marcos**. Brasília, DF: ANA, 2010a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Nota Técnica nº 104 /2010/GEREG/SOF-ANA - Subsídios à elaboração de Marco Regulatório na bacia do rio São Marcos**. Brasília, DF: ANA, 2010b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Resolução nº 562, de 25 de Outubro de 2010**. Brasília, DF: ANA, 2010c.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Subsídios para a discussão da compatibilização da geração de energia hidrelétrica com expansão da agricultura irrigada na bacia do rio São Marcos**. Brasília, DF: ANA, 2014. Disponível em: <www.cbhparanaiba.org.br/_download.php?file=aHR0cDovL2NiaHBhcmFuYWwliYS5vcmcuYnlvdXBsb2Fkcy9kb2N1bWVudG9zL1BSSSF9QQVJBTKfJQkEvUkVWsvNBT19QUkhfUEFSQU5BSUJBL1Vzb3NndWx0aXBsb3NkYUFndWFuYWJhY2lhZG9SaW9TYW9NYXJjb3MucGRm+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil - Informe 2014 - Encarte Especial sobre a Crise Hídrica**. Brasília, DF: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), 2015. Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2017ANA**. Brasília, DF: Agência Nacional de Águas, 2017a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cobrancaearrecadacao/cobrancaearrecadacao.aspx>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br/Home>>. Acesso em: 1 nov. 2017c.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos no Nordeste Capacitação para Gestão das Águas**. Brasília, DF: ANA, 2018. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/115>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA); EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento Da Agricultura Irrigada Por Pivôs Centrais No Brasil - 2014.** Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/arquivos/ProjetoPivos.pdf>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL).** Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html>>. Acesso em: 22 set. 2016.

AMORIM, A.; RIBEIRO, M.; BRAGA, C. Conflitos em bacias hidrográficas compartilhadas: o caso da bacia do rio Piranhas-Açu/PB-RN. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 36–45, 25 fev. 2016.

ARJOON, D.; TILMANT, A.; HERRMANN, M. Sharing water and benefits in transboundary river basins. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, n. February, p. 1–25, 2016.

BRADEN, J. B. Value of Valuation: Introduction. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. December, p. 336–338, 2000.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997 (Política Nacional de Recursos Hídricos). . 1997, p. 14.

BRASIL. Projeto de Lei do Senado nº 495, de 2017. . 2017, p. 1–6.

BROUWER, R.; HOFKES, M. Integrated hydro-economic modelling: Approaches, key issues and future research directions. **Ecological Economics**, v. 66, n. 1, p. 16–22, 2008.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Preço de Liquidação das Diferenças,** 2017. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/precos?_afLoop=127668584551370&_adf.ctrl-state=d2m81razz_91#!%40%40%3F_afLoop%3D127668584551370%26_adf.ctrl-state%3Dd2m81razz_95>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos Monitoramento agrícola- Safra 2017.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_03_09_09_16_09_boletim_graos_marco_2017.pdf>.

DINAR, A.; ROSEGRANT, M. W.; MEINZEN-DICK, R. Water Allocation Mechanisms: Principles and Examples. **Policy Research Working Paper**, v. 1779, p. 1–47, 1997.

ELETROBRÁS. **Potencial Hidrelétrico Brasileiro em cada Estágio por Estado,** 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>>.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS Desktop 10.2.**

Redlands, CA: ESRI, 2013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Cropwat 8.0**Rome, ItalyJoss Swennenhuis for the Water Resources Development and Management Service of FAO, , 2006. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Water uses**. Disponível em: <<http://www.fao.org/Newsroom/en/news/2007/1000726/index.html>>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **The Water-Energy-Food Nexus**. Rome, Italy: FAO, 2014a.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the Context of the Sustainable Energy for All Initiative**. [s.l: s.n.].

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **AQUASTATFAO**NewsroomRome, Italy, 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/Newsroom/en/news/2007/1000726/index.html>>

FRIZZONE, J. A. **Os métodos de irrigação**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2017. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Frizzone/LEB_1571/TEXTO_COMPLEMENTAR_1_-_METODOS_DE_IRRIGACAO.pdf>.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Estudos econômicos específicos de apoio à implementação da cobrança para os setores agropecuário, industrial e hidrelétrico**Agência Nacional de Águas. Brasília, DF: ANA, 2003.

GERALDO, A. et al. **The Construction of the Serra do Facão Hydroelectric Power Plant**. [s.l: s.n.].

GIAMPIETRO, M. et al. **An Innovative Accounting Framework for the Food-Energy-Water Nexus: Application of the MuSIASEM approach to three case studies**. [s.l: s.n.].

GJELSVIK, A. et al. Handbook of Power Systems I. **Hanbook of power systems I, Energy systems**, n. 1, p. 3–32, 2010.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP). **Towards water security: Framework for Action**Global Water Partnership. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Marco para la Accion/framework-for-action-part-1.pdf>.

GOOR, Q. **Optimal Operation of Multiple Reservoirs in Hydropower-Irrigation Systems: A Stochastic Dual Dynamic Programming Approach**. Louvain, Belgium: Université Catholique de Louvain, 2010.

GOOR, Q. et al. Optimal operation of a multipurpose multireservoir system in the Eastern Nile River Basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 10, p. 1895–1908, 2010.

GRIFFIN, R. C. The fundamental principles of cost-benefit analysis. **Water Resources Research**, v. 34, n. 8, p. 2063–2071, 1998.

GRIFFIN, R. C. **Water Resource Economics**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2006.

GRIFFIN, R. C. Benchmarking in water project analysis. **Water Resources Research**, v. 44, n. November, p. 1–10, 2008.

HAROU, J. J. et al. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. **Journal of Hydrology**, v. 375, n. 3–4, p. 627–643, 2009.

HARTMANN, P. **A Cobrança pelo Uso da Água como Instrumento Econômico na Política Ambiental**. Porto Alegre: Associação dos Ex-Bolsistas na Alemanha/RS, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 22 set. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 22 set. 2016.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER AND THE ENVIRONMENT (ICWE). **The Dublin Statement on Water and Sustainable Development**. Dublin, Ireland: The Dublin Statement and Report of the Conference, 1992. Disponível em: <<http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/english/icwedece.html>>.

JAFARZADEGAN, K.; ABED-ELMDOUST, A.; KERACHIAN, R. A stochastic model for optimal operation of inter-basin water allocation systems: A case study. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 28, n. 6, p. 1343–1358, 2014.

JENKINS, M. W. et al. Optimization of California's Water Supply System: Results and Insights. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 130, n. 4, p. 271–280, 2004.

LOPES, A. V.; FREITAS, M. A. DE S. A alocação de água como instrumento de gestão de recursos hídricos: Experiências Brasileiras. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 4, n. 1, p. 5–28, 2007.

LUND, J. R.; CAI, X.; CHARACKLIS, G. W. Economic Engineering of Environmental and Water Resource Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 132, n. December, p. 399–402, 2006.

MAASS, A. et al. **Design of Water Resource Systems**. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1962.

MACHADO, B. G. DE F. **Alocação De Água Entre Os Usos Irrigação E Produção De Energia Elétrica : O Caso Da Bacia Do Rio Preto**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2009.

MACIAN-SORRIBES, H.; PULIDO-VELAZQUEZ, M.; TILMANT, A. Definition of scarcity-based water pricing policies through hydro-economic stochastic programming. v. 16, n. 308, p. 2014, 2014.

MARQUES, G. F.; TILMANT, A. The economic value of coordination in large-scale multireservoir systems: The Parana River case. **Water Resources Research**, v. 49, n. 11, p. 7546–7557, 2013.

MARTINS, R. A. et al. Evolução da prática de irrigação por pivô central no município de Morrinhos (GO) e a pressão sobre os recursos hídricos. **I Simpósio Internacional de Águas, Solos e Geotecnologias**, p. 9, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Caderno da Região Hidrográfica do Paraná**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Desenvolvimento de Matriz de Coeficientes Técnicos para Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

MOTTA, R. S. DA. **Utilização de Critérios Econômicos para a Valorização da Água no Brasil**. [s.l.] Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas, 1998. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_0556.pdf>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): The Mission to Map the World**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>.

OECD. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**. [s.l.: s.n.].

OLIVEIRA, M. C. DE. **Proposta metodológica de alocação de água em períodos de escassez hídrica para o Vale do rio Curu-Ceará**. Fortaleza, CE: Universidade Federal do Ceará, 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/home/>>. Acesso em: 2 jan. 2016.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **OECD environmental outlook to 2050**. Paris, France: OECD, 2012.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **Cobrança pelo uso de recursos hídricos no Brasil: Caminhos a seguir**Éditions OCDE. Paris, France: [s.n.].

PEDROSA, V. D. E. A. **Soluções de Conflitos pelo Uso da Água**. Vitória, ES: [s.n.].

PEREIRA, M. V. F. Optimal stochastic operations scheduling of large hydroelectric systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 11, n. 3, p. 161–169, 1989.

PEREIRA, M. V. F.; PINTO, L. M. V. G. Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning. **Mathematical Programming**, v. 52, n. 1–3, p. 359–375, 1991.

PULIDO-VELAZQUEZ, M. et al. Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain. **Ecological Economics**, v. 66, n. 1, p. 51–65, 2008.

PULIDO-VELAZQUEZ, M.; ALVAREZ-MENDIOLA, E.; ANDREU, J. Design of Efficient Water Pricing Policies Integrating Basinwide Resource Opportunity Costs. **Journal of Water Resources Planning and Management**, n. October, p. 583–593, 2013.

QUIRINO, D. T.; DE SALES, L. F. P.; DA SILVA, O. F. **Aplicação do sensoriamento remoto**

para análise temporal em agriculturas irrigadas por pivô central no município de Cristalina-GO.

Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** Curitiba, PR: INPE, 2011 Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/06.30.18.21/doc/p1282.pdf>>

RASO, L.; MALATERRE, P. O.; BADER, J. C. An effective streamflow process model for optimal reservoir operation using stochastic dual dynamic programming. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 4, 2018.

RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. L. Instrumentos Regulatórios e Econômicos - Aplicabilidade à Gestão das Águas e à Bacia do Rio Pirapama, PE. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, p. 41–70, 2001.

ROGERS, P.; DE SILVA, R. D.; BHATIA, R. 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.

SEMENTES AG MINAS. **Calendário Agrícola**. Disponível em: <<http://agminas.com.br/calendario-agricola/>>.

SHIKLOMANOV, I. A. **World Water Resources. A new appraisal and assessment for the 21st century**. [s.l.] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1998.

SIQUEIRA, V. et al. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274–287, 2016.

SUCCESSFUL FARMING. Pivô central: conheça as vantagens do sistema de irrigação para as lavouras de grãos. **Naiara Araújo**, 2018.

TAKASAGO, M.; CUNHA, C. A. DA; OLIVIER, A. K. G. Relevância da agropecuária brasileira: uma análise insumo-produto. **Revista Espacios**, v. 38, n. 36, p. 31, 2017.

TILMANT, A.; ARJOON, D.; MARQUES, G. F. Economic Value of Storage in Multireservoir Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 3, p. 375–383, 2014.

TILMANT, A.; MARQUES, G.; MOHAMED, Y. A dynamic water accounting framework based on marginal resource opportunity cost. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 3, p. 1457–1467, 2015.

TILMANT, A.; PINTE, D.; GOOR, Q. Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. **Water Resources Research**, v. 44, n. 12, p. 1–17, 2008.

UN WATER. **Water, Food and Energy** Geneva, Switzerland UN Water, , 2017. Disponível em: <<http://www.unwater.org/water-facts/water-food-and-energy/>>

UNITED NATIONS. **A/RES/64/292: The human right to water and sanitation**. New York: 64th General Assembly, 2010. Disponível em: <<http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/RES/64/292&lang=E>>.

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UNECE). **Water-food-energy-**

ecosystem nexus. Disponível em: <<http://www.unece.org/env/water/nexus>>.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). **The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy**. Paris, France: UNESCO, 2014. v. 1

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). **The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs**. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2016.

WELLINGTON, A. M. **The Economic Theory of the Location of Railways: An analysis of the conditions controlling the laying out of railways to effect the most judicious expenditure of capital**. New York, USA: John Wiley and Sons, 1887.

WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources: Hydropower. p. 810, 2016.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). **Managing Water under Uncertainty and Risk**. [s.l: s.n.]. v. 1

YOUNG, R. A.; LOOMIS, J. B. **Determining the Economic Value of Water: Concepts and Methods**. 2nd. ed. New York: Routledge, 2014.

ZHU, X.; VAN IERLAND, E. C. Economic Modelling for Water Quantity and Quality Management: A Welfare Program Approach. **Water Resources Management**, v. 26, n. 9, p. 2491–2511, 2012.