

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL BALDUINO DO NASCIMENTO

MODELAGEM HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO SOCIOAM-  
BIENTAL DE RESERVATÓRIOS

ESTUDO DE CASO: UHE SANTA BRANCA

CURITIBA

2016

GABRIEL BALDUINO DO NASCIMENTO

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA COMO FERRAMENTA DE GESTÃO SOCIOAM-  
BIENTAL DE RESERVATÓRIOS**

**ESTUDO DE CASO:UHE SANTA BRANCA**

Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de MBA em Gestão Ambiental no curso de pós-graduação em Gestão Ambiental, Departamento de Economia Rural e Extensão, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cynara Lourdes da Nóbrega Cunha

CURITIBA

2016

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Curso de MBA em Gestão Ambiental, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, através dos responsáveis por sua organização.

A prof. <sup>a</sup> Cynara, minha orientadora, por sua paciência, prestatividade e disponibilidade durante todo o tempo dedicado à construção deste trabalho.

Aos professores do MBA, em especial àqueles que demonstram grande amor e dedicação em suas profissões, trazendo inspiração aos alunos.

A meus pais e minhas irmãs, que são a sustentação primária da minha vida e me apoiaram muito para que pudesse chegar até aqui.

Aos meus companheiros de trabalho Leonardo, André e Jade, pelas dicas, discussões, críticas, ideias e todo apoio ofertado para o aperfeiçoamento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

A Hidrelétrica Santa Branca S.A., pela disponibilização dos dados necessários ao trabalho.

A Titanium Engenharia, pela disponibilização de ferramentas e de espaço para o desenvolvimento do trabalho.

A Deus, sobretudo, pela existência e possibilidade de evolução contínua.

*"O dado mais importante que separa o ser humano de todos os seus irmãos e primos na escala filogenética é o conhecimento. Só o conhecimento liberta o homem. Só através do conhecimento o homem é livre."*

Éneas Ferreira Carniro

## RESUMO

A potencial deterioração da qualidade das águas proveniente da formação de reservatórios artificiais configura-se como reconhecida problemática socioambiental, em especial num país em que a geração hidrelétrica é protagonista na matriz energética, como o Brasil. Em paralelo, a modelagem computacional se desenvolve ao longo do tempo e permite que prognósticos sejam feitos, em busca de uma gestão social e ambiental equilibrada em torno dos usos múltiplos das águas, ainda em fase de projeto de usinas hidrelétricas (UHEs). A UHE Santa Branca é um empreendimento hidrelétrico que se encontra em fase de projeto e seu exemplo foi utilizado neste trabalho para mostrar o uso da modelagem de circulação hidrodinâmica como ferramenta de estudo sobre os potenciais usos do reservatório. Os resultados obtidos apontam potencial de deterioração na qualidade das águas em certas regiões do reservatório, contribuindo para a discussão científica do tema e, também, para o projeto em desenvolvimento deste aproveitamento hidrelétrico.

Palavras-Chave: Modelagem hidrodinâmica. Reservatório. Santa Branca.

## **ABSTRACT**

The potential deterioration of water quality by the formation of artificial reservoirs is a recognized environmental problem, especially in a country where hydroelectric generation is the main energy source, just as Brazil. Furthermore, computational water quality modeling has been developed over time and enabled forecasting studies to help social and environmental management about the multiple uses of water, even before hydroelectric plants construction. UHE Santa Branca is a hydroelectric project in design phase and its case was used in this work to exalt the hydrodynamic flow modeling as a study tool for the potential uses of water in reservoirs. Results obtained points to perspective deterioration of water quality in some regions of the reservoir and support the theme scientific discussion around this and others hydroelectric plants.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                              | <b>8</b>  |
| <b>2 OBJETIVOS</b>                               | <b>11</b> |
| 2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO                          | 11        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS                        | 11        |
| <b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b>                      | <b>12</b> |
| 3.1 USINA HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA              | 12        |
| 3.2 ATIVIDADES E ESTUDOS PRÉ-EXISTENTES          | 15        |
| 3.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA                      | 17        |
| 3.3.1 Definição da base de trabalho              | 18        |
| 3.3.2 Criação da malha do modelo                 | 19        |
| 3.3.3 Montagem de sistema batimétrico            | 21        |
| 3.3.4 Definição de vazão e condições de contorno | 23        |
| 3.3.5 Simulação computacional                    | 25        |
| 3.4 POTENCIAIS USOS DO RESERVATÓRIO              | 26        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                  | <b>29</b> |
| 4.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DO RESERVATÓRIO  | 29        |
| 4.2 TRANSPORTE DE PARTÍCULAS                     | 33        |
| 4.3 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS                 | 35        |
| <b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>              | <b>39</b> |
| <b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>              | <b>41</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem valor inestimável e é crescente sua demanda no mundo contemporâneo. A todo tempo buscam-se novas soluções no sentido de atender plenamente as necessidades energéticas e evolutivas da sociedade, prezando pela sustentabilidade socioambiental, sem preterir a viabilidade econômica (CHAMON, 2013).

O Brasil ocupa papel de destaque na evolução da oferta de energia hidrelétrica mundial (EPE, 2007), com crescimento bastante acentuado nas últimas décadas (juntamente com o continente Asiático e a América Latina como um todo). Somente entre 1974 e 2004, a potência instalada de usinas hidrelétricas brasileiras quintuplicou (EPE, 2005).

Paralelamente, a demanda esperada de energia elétrica para o ano de 2024 no Brasil é 50% maior em comparação àquela de 2014 (EPE, 2015); ou seja, uma substancial expectativa de aumento em 10 anos, mesmo considerando a conjectura de insegurança e instabilidade das economias nacional e mundial.

Segundo relatório recente da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica), conforme notícia da Secretaria de Energia e Mineração do Estado de São Paulo (2016), há necessidade de contratação de mais 4.000 MW ao sistema nacional só em 2016, sendo admitido risco de demanda superior à oferta em 2018, que pode provocar falta de energia em caso de retomada do crescimento econômico (comparativamente aos anos da década anterior).

Conhecido este cenário e reconhecidas as usinas hidrelétricas como a forma mais confiável de geração elétrica no Brasil (ABBUD, 2012), torna-se evidente a importância desta atividade no cenário nacional. Ademais, vale destacar que a excepcional oferta de água existente no Brasil (cerca de 260.000 m<sup>3</sup>/s - conforme relatório da ANA de 2015) endossa esta "dependência positiva" do setor elétrico brasileiro.

É fundamento básico da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) que "a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas", sendo que os aproveitamentos hidrelétricos não devem, primordialmente, excluir a possibilidade de existências de outros nobres usos d'água. Dentre os usos múltiplos que as águas superficiais têm, destacam-se (PARANÁ, 2016): abastecimento público, pesca e aquicultura, geração de energia, turismo, recreação e navegação.

No tocante aos reservatórios d'água para aproveitamentos hidrelétricos, há um instrumento específico para incentivo dos usos (múltiplos) direcionados aos reservatórios: o Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatórios Artificial - PACUERA. Este se caracteriza como um programa socioambiental de controle de usinas hidrelétricas, definido pela Resolução CONAMA nº 302/2002 como:

"Conjunto de diretrizes e proposições com o objetivo de disciplinar a conservação, recuperação, o uso e ocupação do entorno do reservatório artificial, respeitados os parâmetros estabelecidos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis".

Na Usina Hidrelétrica (UHE) Machadinho, situada no rio Uruguai entre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o PACUERA tornou-se um incentivo ao turismo regional após zoneamento das áreas passíveis de uso do reservatório (de acordo com reportagem do Jornal Boa Vista de 2016). Já sobre o caso da UHE Foz do Chapecó, no mesmo rio Uruguai, Agnolin *et al* (2011) concluíram que o encaminhamento correto do PACUERA pode minimizar ou até evitar situações adversas, comuns em grandes usinas hidrelétricas.

Dentre os conhecidos impactos socioambientais que um empreendimento hidrelétrico pode causar, em primeiro plano destacam-se aqueles sobre a biodiversidade e a relocação populacional. Não menos importantes, todavia, são os impactos sobre a qualidade das águas (CALIJURI *et al*, 2013 e ROCHA, 2011). Estes se dão, muitas vezes, devido à submersão de solos e vegetação durante o alagamento, transformando o ambiente aquático lótico em lêntico – impactando principalmente o meio biótico (LACTEC, 2010).

Através do represamento das águas, e conseqüente represamento de sedimentos e nutrientes, pode ocorrer a floração de algas no reservatório. Este processo, também conhecido como eutrofização, impacta a pesca (CALIJURI *et al*, 2013), a aquicultura (MACEDO, 2010), e os demais usos hídricos que requerem satisfatória qualidade de águas (condições aeróbias).

Rocha (2011) concluiu que implicação direta desta degradação é o comprometimento dos usos múltiplos da água, ferindo um dos principais pilares da Política Nacional de Recursos Hídricos citado.

Surge, então, baseado na problemática exposta, um tema socioambiental de alta relevância a ser estudado e explorado pela comunidade científica.

Para o estudo da poluição hídrica, por exemplo a eutrofização em reservatórios artificiais, a modelagem matemática apresenta-se como uma das ferramentas

mais importantes. Esta ferramenta computacional está associada ao enorme crescimento tecnológico atual e auxilia o processo de previsão/prevenção de impactos futuros, permitindo desenvolvimento de prognósticos detalhados (FLECK, 2013).

De um modo mais amplo, Larentis (2004) expressa que a modelagem matemática da qualidade de água, associada à modelagem de circulação hidrodinâmica, pode ser utilizada de forma a auxiliar na gestão dos recursos hídricos em toda região de uma bacia hidrográfica.

Em casos de licenciamentos ambientais de empreendimentos hidrelétricos, comumente a modelagem de qualidade das águas é utilizada em fase posterior à licença prévia, durante o detalhamento dos programas socioambientais propostos no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) – etapa de elaboração do Plano Básico Ambiental (PBA).

A UHE objeto de estudo encontra-se em etapa de elaboração do PBA e, inicialmente, este trabalho mostra a modelagem hidrodinâmica do seu reservatório. Em sendo latente a relevância de um estudo hidrodinâmico que preste informações sobre o comportamento futuro deste reservatório, através de avaliações de situações futuras de uso hídrico a partir de demandas existentes, demandas potenciais e as previsões sobre a deterioração da qualidade das águas se dá o presente trabalho.

Partindo-se das informações técnicas cedidas pela Hidrelétrica Santa Branca S.A. (proprietária do projeto), este trabalho buscou determinar áreas propícias à retenção hídrica e de contaminantes, que podem provocar problemas à qualidade das águas, de modo a contribuir para as discussões que cercam o empreendimento.

Através de duas simulações diferentes (de circulação hidrodinâmica e de transporte de partículas), surgem subsídios para que os responsáveis pelo projeto possam utilizar os resultados na busca de soluções social, econômica e ambientalmente equilibradas para a sustentabilidade do empreendimento.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

Utilizar o projeto da UHE Santa Branca para estudo de planejamento de uso múltiplo das águas de reservatório artificial, através de previsões de circulação hidrodinâmica obtidas por modelagem computacional.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar dinâmica fluvial do reservatório da UHE Santa Branca;
- Definir a circulação hidrodinâmica do reservatório através da modelagem computacional;
- Estudar o tempo de residência para o reservatório em tela;
- Sobrepor áreas de potencial uso hídrico compartilhado e áreas de potencial deterioração da qualidade da água no reservatório;
- Discutir restrições e permissões quanto ao uso do reservatório, de acordo com a dinâmica fluvial do mesmo;
- Contribuir para as discussões sobre usos múltiplos das águas em reservatórios de usinas hidrelétricas, através deste notório empreendimento, através de modelagem ambiental.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 USINA HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA

Os dados e informações foram obtidos através do EIA publicado do empreendimento (HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA, 2015) e de forma direta com apoio dos consultores e técnicos responsáveis pelo projeto.

A UHE Santa Branca é uma usina hidrelétrica projetada sobre o rio Tibagi, nas abrangências dos municípios de Tibagi e Carambeí, a 30 km do centro urbano mais próximo (Tibagi). Com 62 MW de potência instalada e 14 km<sup>2</sup> de reservatório, a UHE Santa Branca representa um investimento de 400 milhões de reais (HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA, 2015).

A UHE está situada na região dos Campos Gerais paranaenses, reconhecida por seus aspectos históricos e naturais (fitogeográficos e geológicos/geomorfológicos). Localizado sobre o Segundo Planalto Paranaense, o sítio do empreendimento está, aproximadamente, 400 km distante da desembocadura do rio Tibagi – sob coordenadas E 560.710 m e S 7.270.218 m.

O reservatório que deverá ser formado pelo barramento das águas será bastante estreito, devido ao perfil íngreme das margens. Na **FIGURA 1** pode ser observado o reservatório projetado, acompanhando a calha natural do rio Tibagi.

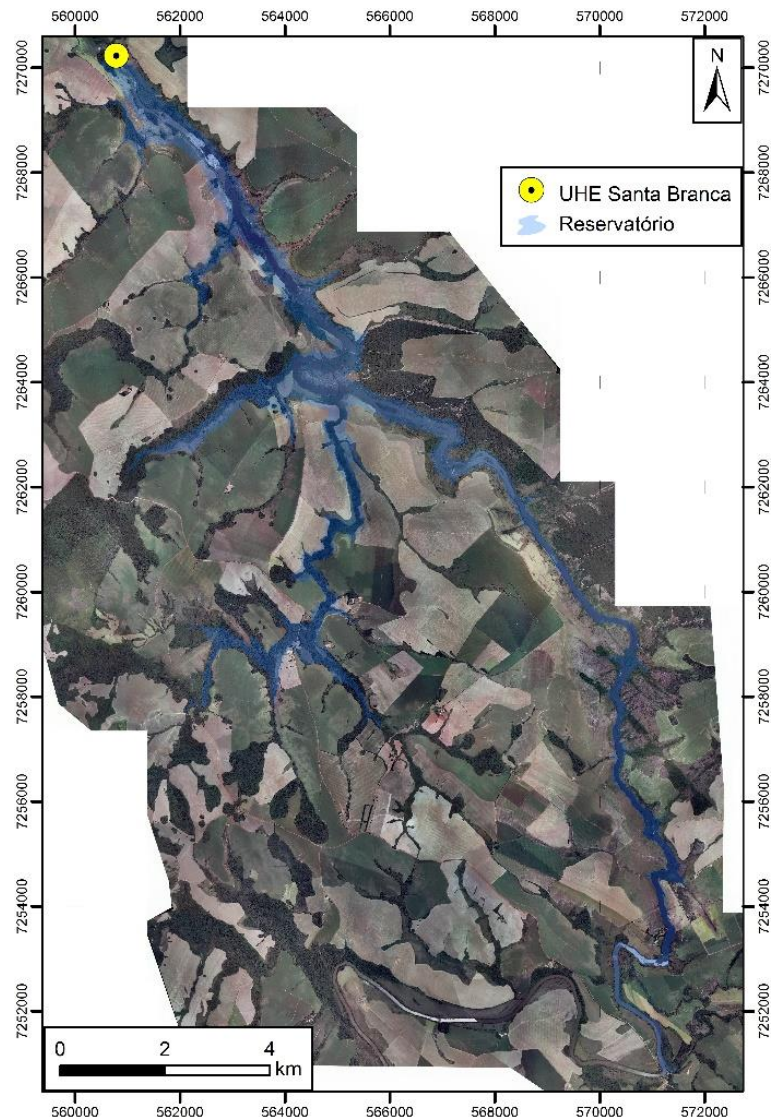


FIGURA 1 – RESERVATÓRIO PROJETADO DA UHE SANTA BRANCA  
 FONTE: HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA (2015)

Observa-se na projeção do reservatório sobre imagem de satélite uma distribuição longitudinal do eixo do reservatório conforme o traçado do próprio rio. Em toda margem direita do reservatório há poucas áreas alagadas, devido ao desnível mais acentuado entre o leito hídrico e a margem. Já a margem esquerda pode ser analisada separadamente em duas regiões: uma mais a montante em que há pouco alagamento, também devido ao relevo local, e outra na porção mais próxima ao barramento, onde as áreas de drenagem de quatro afluentes serão alagadas devido ao perfil mais espreado do local.

Os registros fotográficos (FIGURA 2) elucidam os paredões existentes nas margens do rio Tibagi que moldam o perfil do alagamento da UHE Santa Branca.



FIGURA 2 – RETRATOS DAS MARGENS DO RIO TIBAGI  
 FONTE: HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA (2015)

A **TABELA 1** mostra as principais informações da UHE Santa Branca e seu reservatório.

|  |                        |
|--|------------------------|
| Tipo de operação                                   | Fio d'água             |
| Nível d'Água normal de Montante (NAm)              | 765,00 m               |
| Nível d'Água normal de Jusante (NAj)               | 722,90 m               |
| Área do reservatório                               | 14,18 km <sup>2</sup>  |
| Área alagada                                       | 11,35 km <sup>2</sup>  |
| Volume total                                       | 151,16 hm <sup>3</sup> |
| Comprimento longitudinal                           | 37,7 km                |
| Profundidade média                                 | 12,4 m                 |
| Tempo de enchimento (para Q <sub>50%</sub> diário) | 21 dias                |
| Vida útil  | 62 anos                |
| Tempo de residência (para Q <sub>mit</sub> )       | 11,7 dias              |

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DO RESERVATÓRIO DA UHE SANTA BRANCA  
 FONTE: Adaptado de HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA (2015)

A UHE Santa Branca operará através de um regime "à fio d'água", ou seja, com mínimo deplecionamento do nível do reservatório. Esta característica faz com que em grande parte do tempo, a cota normal de montante seja mantida (NAm).

O desnível existente de 42 m (entre NAm e NAj), juntamente com o volume hídrico disponível, é o responsável pelo potencial energético do empreendimento.

Os pouco mais de 14 km<sup>2</sup> de reservatório alagarão cerca de 11,35 km<sup>2</sup> de área seca, perfazendo um volume hídrico superior a 150 hm<sup>3</sup>. Chama atenção o perfil bem alongado do lago: seu extenso comprimento (37,7 km) distribuído em uma profundidade média de 12,4 m.

Estima-se, ainda de forma preliminar, que o reservatório se encherá em 21 dias – cálculo a partir da vazão diária que ocorre em 50% do tempo, sendo que uma partícula levará aproximadamente 12 dias para percorrer todo o reservatório – cálculo a partir da vazão média de toda série histórica.

Neste projeto, ademais, a qualidade das águas tem destaque devido a diversos fatores: o perfil típico "encaixado" do rio Tibagi, a existência de outra UHE instalada à jusante no mesmo rio, a possibilidade de existência de outras UHEs a jusante no mesmo rio, o potencial minerário de diamante do rio, o potencial de exploração turística associado ao rio, as captações d'água para abastecimento municipal feitas diretamente do rio (como em Tibagi e em Londrina), dentre outros agravantes.

### 3.2 ATIVIDADES E ESTUDOS PRÉ-EXISTENTES

Além de estudos hidráulicos e hidrológicos referenciados indiretamente, outros foram desenvolvidos até presente momento do projeto, em que são vigentes:

- Licença Prévia (LP) junto ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP) - emitida em 25 de janeiro de 2016;
- Despacho de aprovação do Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - emitido em 02 de fevereiro de 2016.

No presente trabalho foram utilizadas bases de dados produzidas por estudos de cartografia, topografia, geoprocessamento, hidrometria/hidrologia, socioeconomia, dentre diversos outros. Dois órgãos fundamentais regulam as metodologias utilizadas pela equipe técnica do projeto em questão: a ELETROBRÁS e o IAP.

Os serviços cartográficos foram desenvolvidos visando formar uma base cartográfica do empreendimento. Para tanto, foram adquiridas aerofotos com recobrimento aéreo com escala 1:30.000, feitas campanhas de apoio terrestre de campo, realizada a aerotriangulação digital e executada a Restituição Aerofotogramétrica Digital.

Os levantamentos topográficos e geodésicos, por sua vez, são complementares aos levantamentos cartográficos descritos. Para estes foram feitos os trabalhos de perfilamento longitudinal, levantamento de vértices para a aerotriangulação, implantação de marcos geodésicos, transporte de coordenadas e levantamento das seções topobatimétricas na área do empreendimento.

Através destas duas macroatividades (cartografia e topografia), surge a base de trabalho do geoprocessamento – expandindo-se para um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A definição da cota de alagamento, por exemplo, se dá com a amarração da cota 765 m (NAm) sobre as ortofotos a partir das curvas de nível.

As medições de vazão foram realizadas em diversas seções distribuídas em todo o futuro reservatório da UHE Santa Branca, além de medições nos maiores contribuintes do reservatório (rio principal e maiores afluentes). O equipamento utilizado foi o consagrado ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), permitindo medição de velocidade e vazão em cada seção. As duas fotografias mostradas na **FIGURA 3** ilustram a operação da ferramenta tecnológica.



FIGURA 3 – RETRATOS DO TRABALHO DE HIDROMETRIA  
FONTE: HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA (2015)

Os dados primários obtidos somaram-se aos dados históricos no estudo hidrológico. Neste ponto, pôde ser consolidado todo arcabouço de informações hídricas a respeito do projeto – fundamental na concepção de qualquer aproveitamento hidrelétrico. Ao todo foram consultadas 26 estações hidrológicas, entre fluviométricas e pluviométricas, sendo que duas fluviométricas se localizam nos dois principais contribuintes do reservatório: o próprio rio Tibagi e o rio Pitanguí. Como resultado obtiveram-se as "vazões de projeto", que estimam a vazão afluente da UHE e, conseqüentemente, o seu potencial energético.

Não menos importante, durante a elaboração do EIA, foram investigados os aspectos socioeconômicos potencialmente impactados pelo empreendimento. Nestes, todas as propriedades lindeiras ao futuro reservatório foram visitadas, além da realização de entrevistas com os proprietários e moradores destas, a fim de se conhecer os usos d'água existentes atualmente e os potenciais a serem modificados (positiva ou negativamente) pela instalação do aproveitamento hidrelétrico.

Também foram realizadas pesquisas históricas dos usos hídricos desenvolvidos no passado que, conseqüentemente, traduzem potenciais não aproveitados ou extintos na região. A dinâmica econômica recente pelo qual passou o estado paranaense, em especial os Campos Gerais, transformou a utilização dos recursos hídricos inclusive.

### 3.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A primeira fase deste trabalho é a modelagem hidrodinâmica do reservatório da UHE Santa Branca. Em outras palavras, inicialmente foi desenvolvido o estudo de previsões do comportamento hídrico do lago, uma vez que este é base para o atendimento dos objetivos propostos.

Preliminarmente a qualquer modelagem computacional, por obviedade, se dá a seleção do modelo (e software) a ser utilizado. Este deve atender os objetivos do trabalho, em se conhecendo suas limitações e as implicações desta escolha.

Devido a sua enorme aplicabilidade e sucesso em casos semelhantes, o SisBaHiA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) foi o escolhido. Como os próprios responsáveis definem, este é "um sistema profissional de modelos computacionais" sobre registro da Fundação Coppetec – vinculada ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rosman (2016) traça a aplicabilidade deste sistema em simulações de reservatórios, lagos, lagoas, canais, rios, estuários, baías, em vias de estudo de processos que envolvem sistemas ambientais complexos.

Constituem este sistema: um modelo de circulação hidrodinâmica tridimensional (3D) ou bidimensional na horizontal (2DH), um modelo de transporte euleriano advectivo-difusivo com reações, um modelo de qualidade da água e eutrofização, um modelo de transporte lagrangeano determinístico e outro probabilístico, e um modelo de geração de ondas. Seus modelos matemáticos governantes são formados por equações diferenciais parciais de primeira ordem – em termos temporais – e equações diferenciais parciais de segunda ordem – em termos espaciais (CORREA, 2013).

O método de elementos finitos é o adotado pelo modelo para a discretização espacial horizontal, sendo que os elementos podem ser exclusivamente quadrangulares biquadráticos, triangulares quadráticos ou ainda resultado da combinação de ambos (ROSMAN, 2016). Tal característica confere adaptações a sistemas irregulares de fronteiras, como é o caso do reservatório em discussão. Ainda, Giacchini (2012) aponta que a ideia central do método é discretizar o domínio espacial de modo a representá-lo, ainda que aproximadamente, por quantidade finita de elementos, tornando-se assim robusto e aplicável em domínios elaborados.

Dois modelos disponíveis no SisBaHiA® foram utilizados neste trabalho: o módulo 2DH (hidrodinâmico bidimensional) e o módulo de transporte lagrangeano.

O módulo hidrodinâmico 2DH foi tomado para aplicação deste trabalho devido à distribuição bidimensional na horizontal ser adequada à problemática hidrodinâmica do reservatório a ser formado, considerada a dimensão horizontal muito superior à dimensão vertical. Soto (2004) cita que para a maioria dos casos práticos, o 2DH é suficiente para a simulação de campos de corrente em corpos d'água rasos. Para qualquer análise hidrodinâmica ou de qualidade das águas a ser feita sobre um reservatório, a modelagem 2DH é etapa fundamental e necessária.

O módulo de transporte lagrangeano, por sua vez, é alicerçado pela modelagem 2DH. Este modelo é amplamente utilizado para estudo de plumas ou "nuvens de partículas", com enfoque principal na posição de cada partícula (ROSMAN, 2001). Gobira (2008) estudou o espalhamento de óleo em águas rasas através de um modelo lagrangeano (baseado na modelagem hidrodinâmica de águas rasas) obtendo relativo sucesso e tecendo recomendações para aprimoramento desta ferramenta.

Cinco etapas sequenciais de trabalho compõem esta primeira fase, sendo elas:

- Definição da base de trabalho;
- Criação da malha do modelo;
- Montagem do sistema batimétrico;
- Definição de vazão e condições de contorno;
- Simulação computacional.

### 3.3.1 Definição da base de trabalho

A base referida é a representação real do domínio espacial de trabalho, onde o mesmo pode ser visualizado. Todos os produtos e subprodutos gerados no desenvolvimento da modelagem computacional requerem este espaço para apresentação.

A partir da base de dados SIG construída pela Hidrelétrica Santa Branca S. A. e disponibilizada para o presente estudo, foram obtidos os dados espaciais do reservatório projetado: coordenadas geográficas, contorno em caminhamento e metadados. Em plataforma SIG foram extraídas as posições métricas de latitude e longitude de todos os pontos que formam o polígono do futuro reservatório.

Os mesmos foram ordenados de modo sequencial e foram adicionados pontos externos de controle nas extremidades nordeste, noroeste, sudeste e sudoeste da

base. Assim, todo domínio da base de trabalho estava levantado e ordenado conforme suas coordenadas espaciais e limites externos.

Através de recursos computacionais a base foi concebida com a transformação dos arquivos em formato compatível com o SisBaHiA® e suas extensões. Na FIGURA 4 pode ser visualizado o domínio utilizado para a modelagem hidrodinâmica.

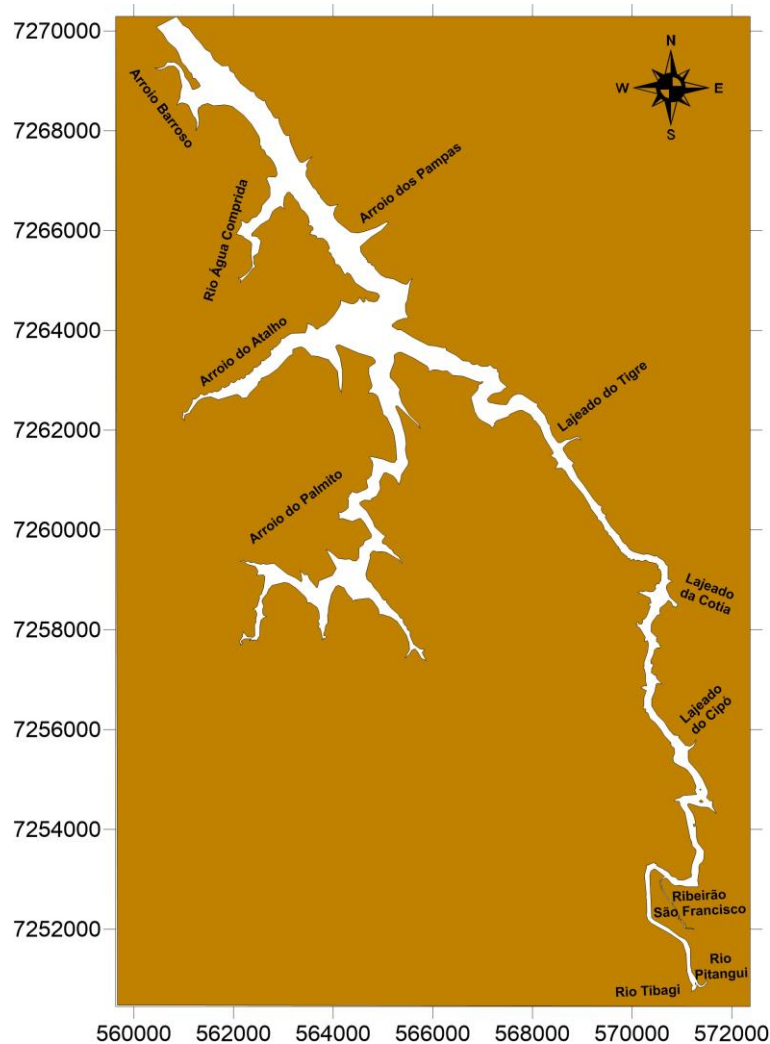


FIGURA 4 – DOMÍNIO DA MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA UHE SANTA BRANCA  
FONTE: O Autor (2016)

### 3.3.2 Criação da malha do modelo

Concluída a primeira etapa da modelagem hidrodinâmica, foi construída a discretização espacial do modelo hidrodinâmico. Conhecida como "malha" por seu aspecto visual, esta é formada por um conjunto de elementos finitos com nós comuns que os unem.

Em termos práticos, foram traçados manualmente elementos quadrangulares sobre o domínio, no caso: o próprio contorno do reservatório. Para tal foi utilizado o software "ArgusOne", compatível com o SisBaHiA®.

Se o domínio é descrito como "traçado real" do universo de trabalho, a malha deve ser entendida como o "traçado matemático" do mesmo universo. Algumas premissas foram adotadas visando facilitar e viabilizar as etapas de cálculo seguintes. Citam-se: buscar homogeneidade entre os elementos, buscar similaridade de áreas entre os elementos, evitar formação de ângulos muito agudos ou obtusos nos quadriláteros e delinear continuidade dos elementos conforme fluxo hídrico natural.

Vale destacar que as funções automáticas para criação de malha foram executadas sem sucesso. Apesar de mais trabalhosa, as construções manuais de malha tendem a ser mais precisas, por, obviamente, serem completamente manipuladas e assistidas pelo usuário do software.

Na **FIGURA 5** está ilustrada a malha do reservatório da UHE Santa Branca desenvolvida.

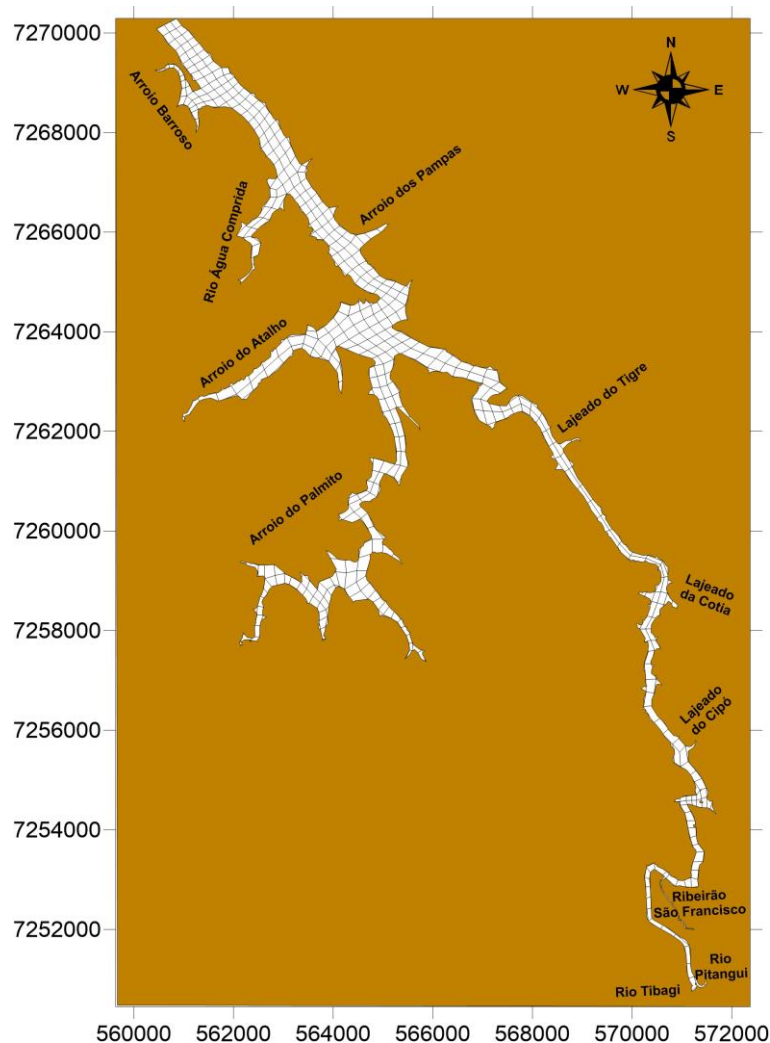


FIGURA 5 – MALHA SOBRE O RESERVATÓRIO DA UHE SANTA BRANCA  
FONTE: O Autor (2016)

### 3.3.3 Montagem de sistema batimétrico

O aqui denominado "sistema batimétrico" é o conjunto de informações de profundidade (ou altura da coluna d'água) do futuro reservatório. Estes dados são de extrema importância nas simulações hidrodinâmicas, uma vez que a velocidade horizontal é função da profundidade em cada ponto de cálculo.

Para a montagem desta enorme nuvem de pontos foram utilizados os dados fornecidos pela Hidrelétrica Santa Branca S.A. e realizados ajustes necessários. Produtos dos levantamentos topográficos, cartográficos e hidrológicos foram utilizados.

Os dados de altitude das curvas de nível e pontos cotados foram adicionados a uma mesma base das seções topobatimétricas (níveis d'água}, formando assim um grande aglomerado de dados altimétricos.

Este denso sistema de informações, especialmente os pontos sobre as curvas de nível, foi suavizado de modo a buscar maior homogeneidade na distribuição espacial dos dados. Em outras palavras, foram realizados ajustes sobre os pontos para que não existissem grandes aglomerados regionais de pontos ou "vazios" que pudessem acarretar em problemas ou dificuldades futuras.

Ainda assim, visto que as seções topobatimétricas realizadas não cobriam o reservatório com a precisão necessária, foram necessárias interpolações lineares direcionadas de dados.

Em plataforma SIG, nos trechos hídricos entres duas seções topobatimétricas, foram definidos pontos com variação linear da batimetria a partir da cota 765 metros (delimitação do reservatório). Para estes pontos foi atribuída profundidade correspondente a variação linear admitida. Cabe ressaltar que as ilhas e outros pontos cotados também foram considerados para aperfeiçoar o mecanismo artificial. A **FIGURA 6** ilustra uma região do curso hídrico entre duas seções.

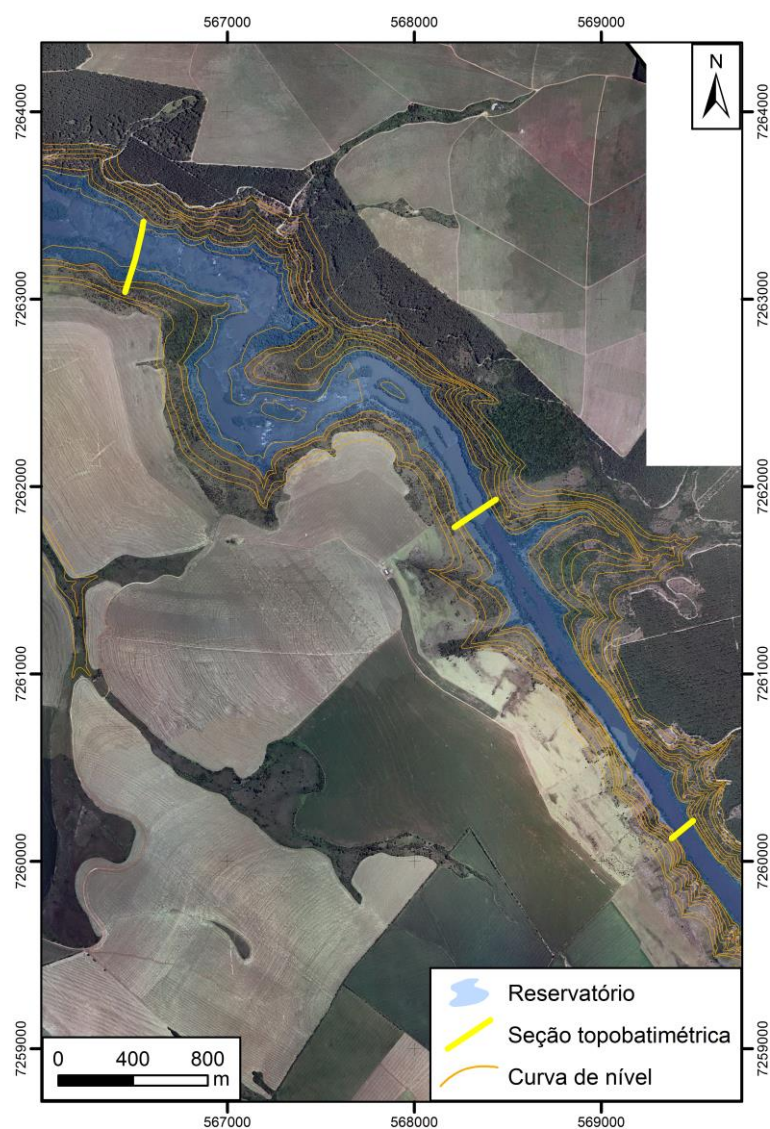


FIGURA 6 – DETALHE DE REGIÃO ENTRE DUAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS  
 FONTE: O Autor (2016)

Na imagem apresentada, as curvas de nível e as seções topobatimétricas são as informações necessárias para as simulações deste trabalho. Pela falta de dados de batimetria no leito do rio, as interpolações lineares direcionadas foram realizadas e deram origem aos pontos interpolados que representam o talvegue do rio Tibagi.

Outra região de destaque para a batimetria é a barragem do empreendimento. Nesta localidade foram adicionadas as cotas referentes à "entrada" da água no sistema gerador de energia elétrica. A saída do reservatório se dá, dependendo da vazão afluente, através do vertedouro central na barragem e da tomada d'água na porção lateral (margem esquerda).

Após concepção de todo sistema batimétrico, foi realizada a interpolação dos dados através do software "Surfer", compatível com o SisBaHiA®. O método empregado utiliza-se dos "vizinhos mais próximos", e o resultado pode ser observado na

FIGURA 7.

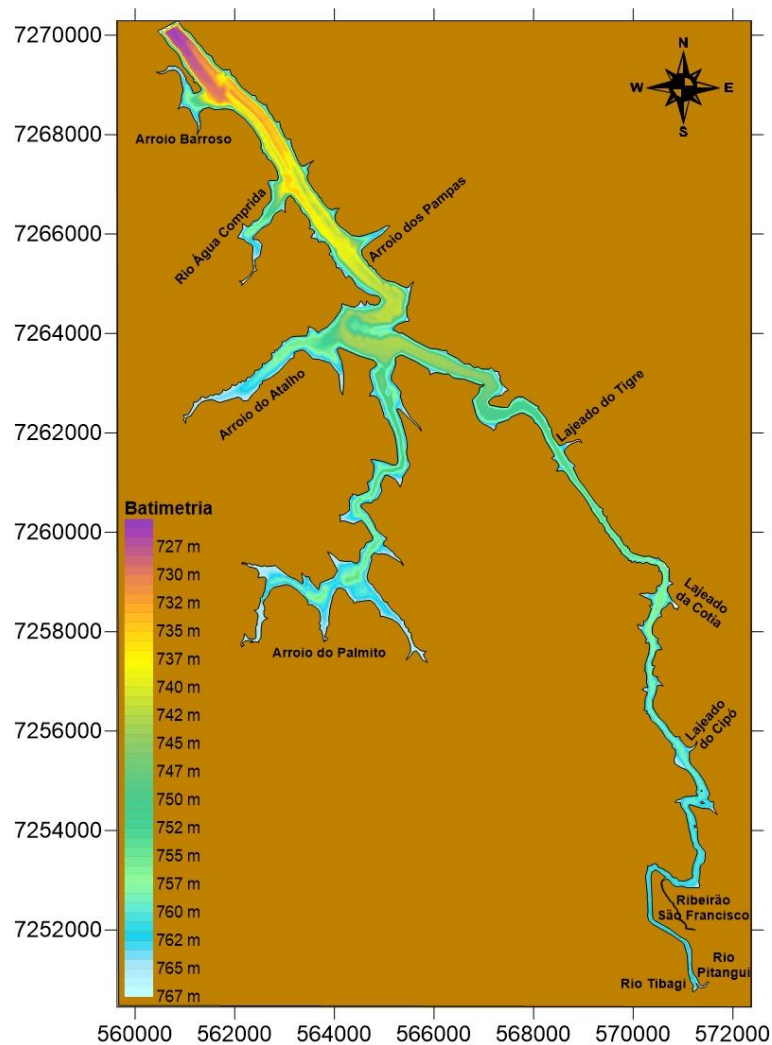


FIGURA 7 – DETALHE DE REGIÃO ENTRE DUAS SEÇÕES TOPOBATIMÉTRICAS  
 FONTE: O Autor (2016)

### 3.3.4 Definição de vazão e condições de contorno

A última etapa de trabalho, que antecede a execução do modelo, engloba a inserção dos dados de vazão e a definição das condições de contorno.

O estudo hidrológico da UHE Santa Branca considera um sistema fechado no reservatório, sendo que as contribuições diretas que chegam pelos afluentes somadas representam a vazão total que passa pela barragem e circuito gerador de energia elétrica.

As vazões de projeto consideram 26 estações de monitoramento com dados históricos desde o ano de 1931. Já as vazões de entrada do reservatório (estação Balsa do Pitangui, especificamente por ter a maior contribuição) tem dados disponíveis desde 1988. Desta forma, para equalizar os períodos de análise hidrológica, os

dados de vazões de projeto foram truncados para o ano de 1988. A partir disto, obtiveram-se as vazões de saída e da principal entrada do reservatório (contribuição do próprio rio Tibagi).

Através de uma curva de permanência, obtiveram-se os percentuais de tempo em que ocorrem vazões iguais ou superiores. A partir desta interpretação hidrológica tem-se maior precisão estatística do comportamento hídrico. Diferentemente de uma vazão média de longo termo, por exemplo, a vazão de ocorrência em 50% do tempo (obtida através da curva de permanência) representa mais fielmente o "comportamento médio" do rio para uma simulação de permanência mediana.

As outras vazões de entrada foram obtidas através de comparação entre as áreas de drenagem. Em proporção de área de contribuição, todas as vazões afluentes no lago foram calculadas para o sistema fechado. A partir destas, puderam ser calculadas as vazões específicas de cada seção de entrada do reservatório.

Com tais informações, as mesmas foram especificadas nos nós da malha que representam os limites de afluência do reservatório.

Na **TABELA 2** estão mostradas as vazões e áreas de drenagem dos principais corpos hídricos afluentes do reservatório, assim como tais dados para todo o aproveitamento hidrelétrico.

| LOCALIDADE             | ÁREA DE DRENAGEM (km <sup>2</sup> ) | VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) |
|------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| UHE Santa Branca       | 7665,60                             | 148,65                    |
| Rio Tibagi             | 6253,30                             | 121,26                    |
| Rio Pitangui           | 1025,44                             | 19,88                     |
| Arroio do Palmito      | 72,92                               | 1,41                      |
| Lajeado da Cotia       | 55,02                               | 1,07                      |
| Ribeirão São Francisco | 50,57                               | 0,98                      |
| Lajeado do Tigre       | 40,19                               | 0,78                      |
| Rio Água Comprida      | 33,43                               | 0,65                      |
| Arroio Barroso         | 24,43                               | 0,47                      |
| Arroio do Atalho       | 19,36                               | 0,38                      |
| Lajeado do Cipó        | 13,12                               | 0,25                      |
| Arroio dos Pampas      | 5,50                                | 0,11                      |

TABELA 2 – DADOS HIDROLÓGICOS DA MODELAGEM MATEMÁTICA  
FONTE: O Autor (2016)

Para corpos de água rasos, como o caso em questão, Rosman (2001) explica que tipicamente as fronteiras de terra devem ter limitações normais ao contorno e as

abertas devem ter especificadas as posições da superfície livre. Condições adicionais também podem ser necessárias devido à particularidade de cada sistema.

No trabalho em questão, todas as fronteiras são fechadas (de terra) e foram definidas conforme os tipos de nós que as compõem, existindo aquelas com vazão de entrada, outras com vazão de saída (barragem), outras de curvas bastante acentuadas etc. Tais definições são condições fundamentais para os cálculos realizados em cada nó.

Na base computacional do SisBaHiA®, para cada nó de contorno foram definidas velocidade normal e tangencial.

### 3.3.5 Simulação computacional

A principal etapa deste trabalho é o cálculo das velocidades horizontais que estarão presente no futuro reservatório. A formulação matemática do modelo hidrodinâmico 2DH se baseia na determinação instantânea das velocidades horizontais (médias na vertical) e da posição de superfície livre (ROSMAN, 2016).

Para que os cálculos fossem possíveis, além das definições de batimetria e contornos, foram definidas condições meteorológicas de vento e os intervalos temporais de cálculo.

Em busca do objetivo deste trabalho, a simulação de um único cenário de vazão permanente representativa se fez suficiente e satisfatória. Foi tomada a vazão de recorrência em 50% do tempo ( $Q_{50\%}$ ) para a modelagem hidrodinâmica da UHE Santa Branca, em entendimento que esta representa um cenário permanente comum e padrão para estudo.

Com vazão permanente de entrada, para um passo de tempo de 20 segundos, 40 dias foram simulados. Além disso, foi inserida uma condição meteorológica de vento, também uniforme e permanente, conforme os estudos climatológicos da UHE Santa Branca: velocidade média de vento em 2,1 m/s, no sentido leste.

A absorção do domínio foi imposta nos nós da malha que representam a entrada da vazão no circuito gerador da usina, no lado esquerdo da barragem, garantindo vazões de saída iguais às de entrada no sistema.

As condições iniciais foram inseridas nas entradas dos nós que representam afluência ao reservatório, conforme ilustrado anteriormente. De forma permanente,

durante todo processamento de dados, as vazões contribuíram para a circulação hidrodinâmica do reservatório.

Ao final deste processo, obteve-se o padrão de circulação hidrodinâmica do reservatório da UHE Santa Branca.

Em fase posterior e dependente desta, também foi executado o modelo de transporte lagrangeano.

### 3.4 POTENCIAIS USOS DO RESERVATÓRIO

É esperado que surjam interesses ao redor de um empreendimento como a UHE Santa Branca. Agravam esta situação: o modesto porte do município em que o mesmo se insere (Tibagi) e os já existentes usos hídricos em curso na região.

O turismo é um dos grandes atrativos nos Campos Gerais paranaenses, sendo exploradas áreas como patrimônio histórico, ecoturismo, turismo rural, gastronomia, cultura, dentre diversas outras. Neste contexto, o rio Tibagi tem elevada importância. Seja de maneira direta (por exemplo, os esportes aquáticos, passeios no rio e cachoeiras) ou de maneira indireta (por exemplo, no histórico de extração diamantífera do rio que hoje atrai turistas para o Museu do Garimpo em Tibagi), este curso d'água já possui valor neste cenário turístico.

Desta forma, o diagnóstico realizado para o EIA/RIMA da UHE Santa Branca buscou informações sobre os atuais usos hídricos com os proprietários e moradores de terras lindeiras ao futuro reservatório, além dos potenciais usos já vislumbrados. Entendendo, portanto, que este público diretamente afetado pelas obras é aquele que deverá, principalmente, fazer uso do reservatório futuro. Não se preterindo, por outro lado, a possibilidade futura de uso comercial do reservatório – em que pessoas de outras localidades também usufruirão do lago formado.

Neste trabalho foram reestruturadas as informações disponíveis e criadas "regiões de interesse" do futuro reservatório. Para cada uma destas, de interesses e características semelhantes, os usos atuais e os potenciais usos hídricos foram agrupados para que pudessem ser confrontados com os produtos da modelagem hidrodinâmica: possibilitando que a mesma pudesse ser utilizada como mecanismo de gestão socioambiental.

Para facilitar a discussão, foram divididas as áreas lindeiras ao reservatório: área A representando toda margem esquerda; área B representando a Fazenda Santo

André (em Carambeí); área C representando o Núcleo Balsa Santa Terezinha; e a área D representando o restante da margem direita. A FIGURA 8 FIGURA 9 mostra a localização destas áreas.

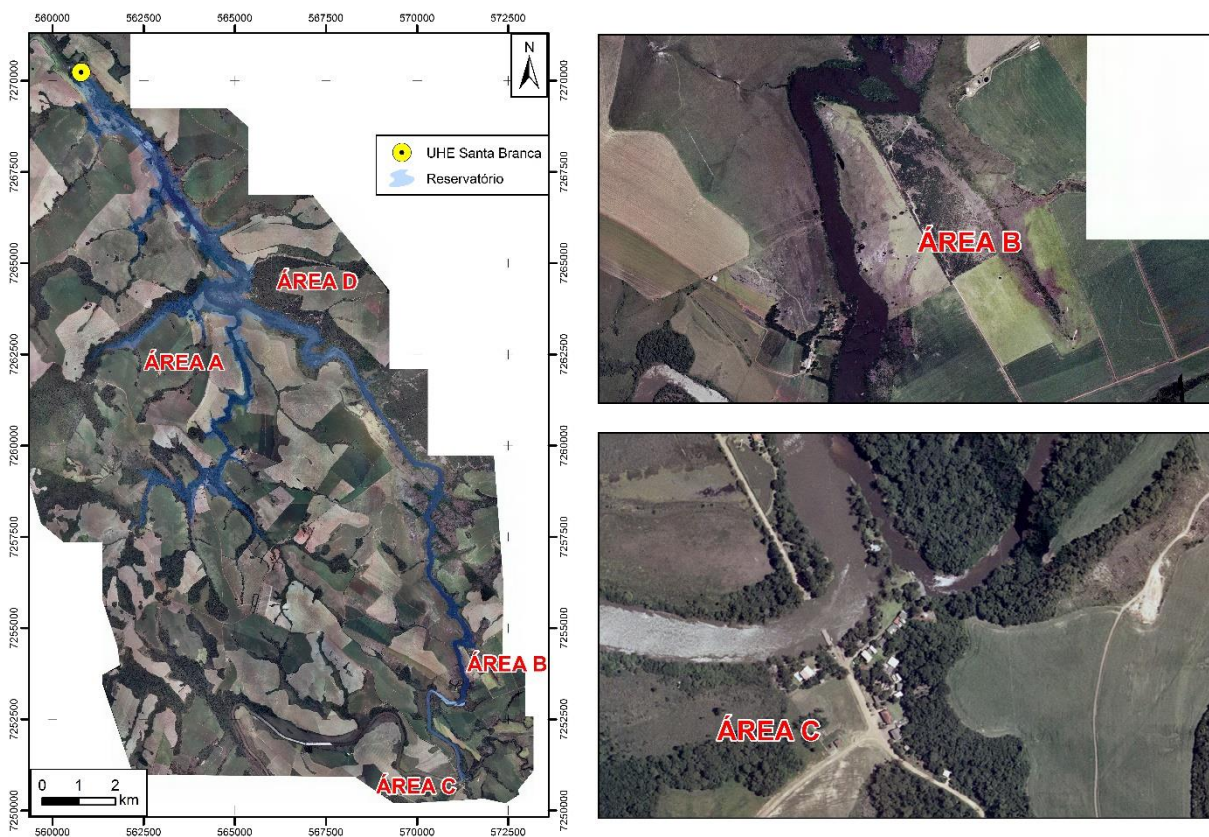


FIGURA 8 – ÁREAS DE INTERESSE SOBRE USOS HÍDRICOS NO RESERVATÓRIO  
FONTE: O Autor (2016)

Em 30 propriedades rurais afetadas pelo empreendimento (além do Núcleo Balsa Santa Terezinha), existem apenas 20 edificações (ranchos) de apoio para atividades de lazer no rio Tibagi. Destas, 6 estão na margem direita do corpo d'água, 6 na margem esquerda e 8 nas ilhas inseridas no futuro reservatório.

O fato da existência deste modesto número de edificações e apenas alguns pontos de acesso ao rio aponta uma subutilização dos recursos hídricos na localidade. De acordo com o diagnóstico socioeconômico, quase a totalidade dos ranchos à beira-rio são de uso raro e esporádico. Basicamente, o acesso ao rio é feito pelos próprios proprietários rurais, que, de maneira geral, não residem na localidade. Assim, as localidades majoritárias de acesso ao rio são utilizadas apenas para veraneio – vide área A.

Investigações feitas nos estudos socioambientais da UHE apontam que nesta área são desenvolvidos pesca, recreação de contato primário, passeios de barco e lazer em geral. Em poucas propriedades a dessedentação animal também é um uso hídrico, visto que predominam no rio margens íngremes e pouco acessíveis.

Destacam-se, em contrapartida do cenário geral, duas localidades: área B e área C. Esta é identificada como Núcleo Balsa Santa Terezinha e aquela, como Fazenda Santo André.

O Núcleo da Balsa Santa Terezinha é uma localidade situada próxima à desembocadura do rio Pitangui no rio Tibagi. Próxima à divisa dos municípios de Ponta Grossa, Carambeí e Tibagi, abriga diversos ranchos, casas, edificações e outras estruturas de veraneio, além da própria balsa que faz a travessia do rio Tibagi para estradas rurais. Por estarem situadas próximas às áreas urbanas de Carambeí e Ponta Grossa, as estruturas existentes têm uso mais constante, fazendo desta localidade a de maior potencial uso. Os proprietários e habitantes do local já demonstram interesses de exploração comercial durante o período de obras (com fornecimento de alimentação e outros tipos de apoio) e durante a operação da UHE (com atividades comerciais de lazer no reservatório).

Na área da Fazenda Santo André, uma das poucas propriedades no município de Carambeí, um cenário ímpar existe: as glebas de terra são muito subdivididas (em vários proprietários), sendo que a destinação destas é apenas o acesso ao rio. Menos estruturada que o Núcleo Balsa Santa Terezinha, esta localidade apresenta alguns ranchos e acessos de barco ao rio. As atividades desenvolvidas são pesca, recreação de contato primário e passeios de barco (também para acesso às ilhas existentes). Os proprietários demonstram interesse em potencializar os usos já existentes, investir em infraestrutura e explorar comercialmente a localidade.

A última área de destaque (área D) é aquela de menor destaque para usos múltiplos do reservatório, isto devido às altas declividades das margens do rio e à inacessibilidade de quase toda margem direita do reservatório. Nesta região se identificaram poucos ranchos e estruturas para lazer hídrico, assim como acessos ao corpo d'água (apenas 3). Não foram apontadas, nas entrevistas com a população desta localidade, interesse atual em mais usos futuros, apesar desta potencialidade não ser descartada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em ordem de apresentação, trata-se: do comportamento hidrodinâmico do reservatório (a ferramenta principal da análise aqui feita), do transporte de partículas no reservatório (alicerçado na modelagem hidrodinâmica 2DH) e da gestão socioambiental sobre o mesmo reservatório. A discussão sobre cada tema é apresentada em tópico individual, apesar da sinergia e interdependência dos mesmos.

### 4.1 COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DO RESERVATÓRIO

De antemão, cabe reiterar que o cenário modelado se refere a um estado permanente, com vazões de entrada permanentes- de ocorrência em 50% do tempo ( $Q_{50\%}$ ), conforme série de dados históricos.

O resultado da modelagem hidrodinâmica 2DH é apresentado por um campo de vetores que indicam sentido, direção e intensidade (módulo) do campo velocidade média de escoamento. Na **FIGURA 9** apresenta-se o padrão de movimentação e circulação do reservatório da UHE Santa Branca.

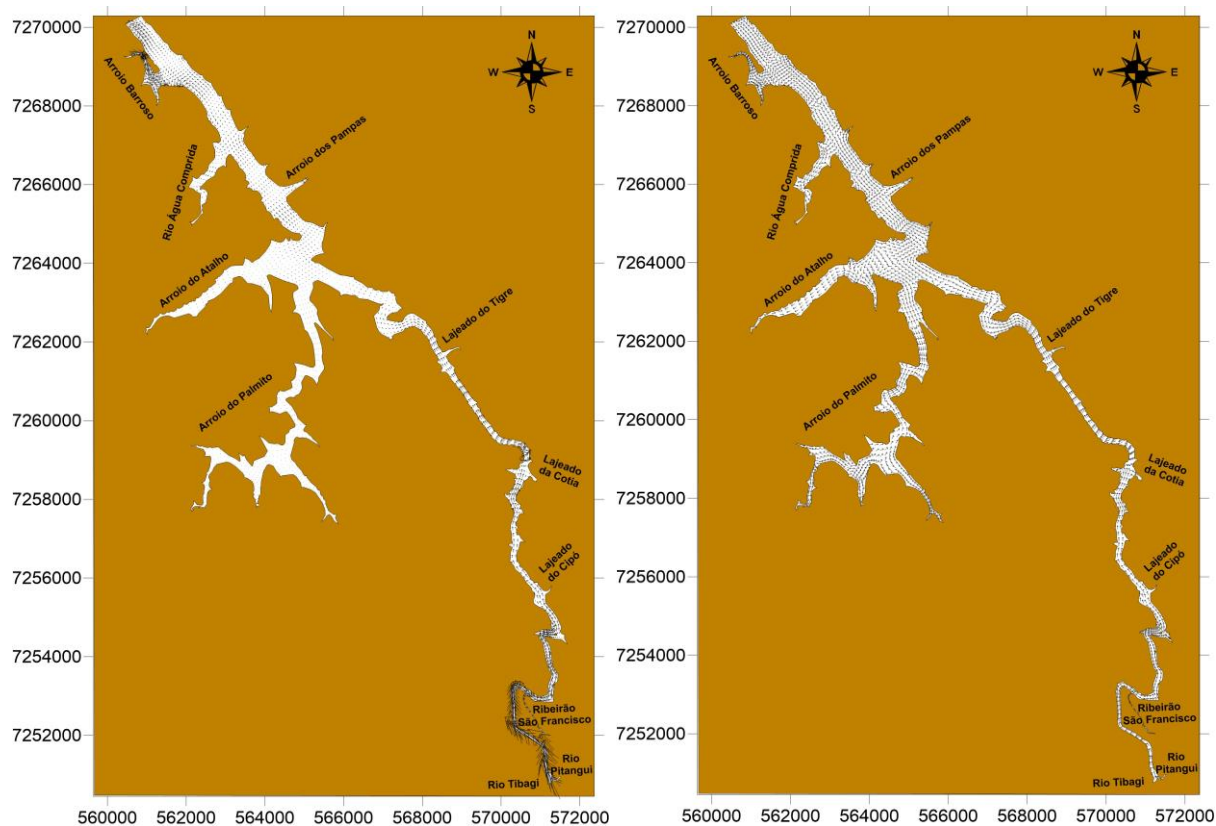
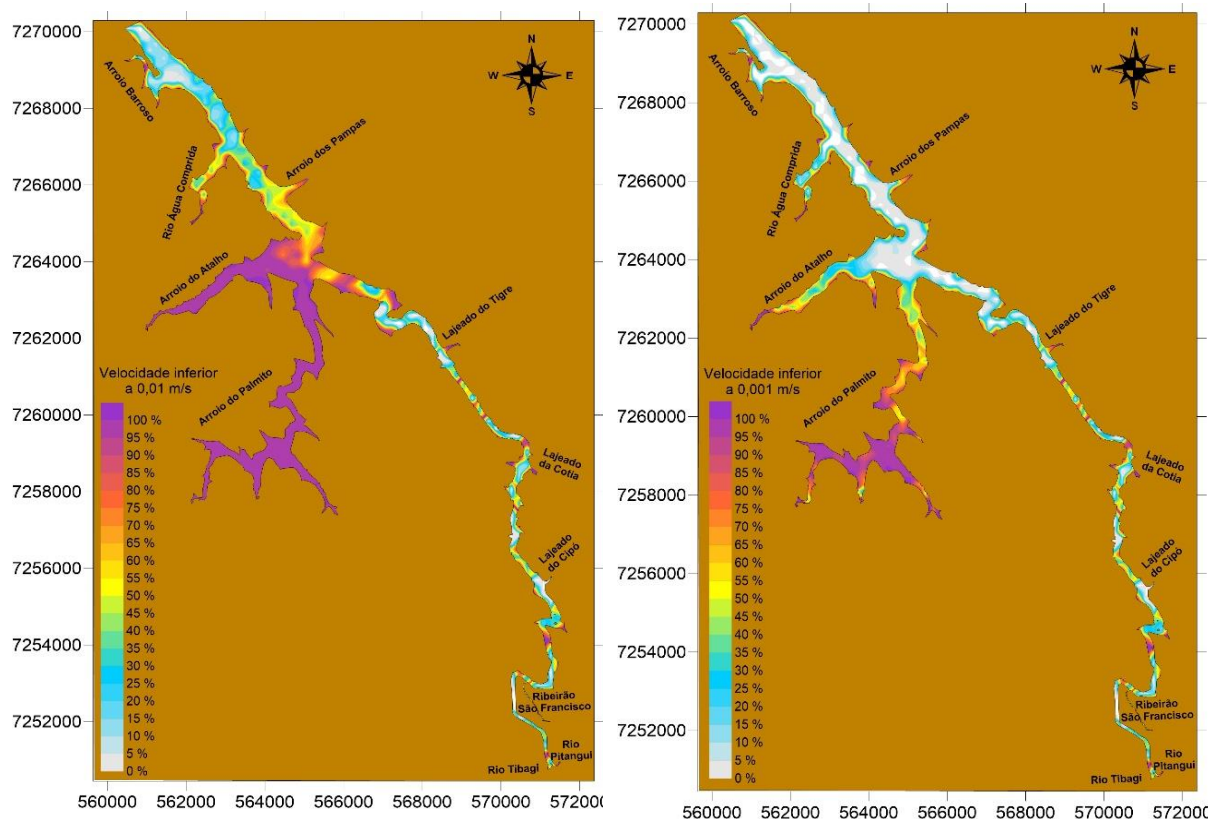


FIGURA 9 – VETORES DE VELOCIDADE SUPERFICIAL COM (Esq.) E SEM MÓDULO (Dir.)  
FONTE: O Autor (2016)

Na **FIGURA 10** está ilustrado o percentual de ocorrência de velocidades superficiais inferior à 1 cm/s e à 1 mm/s: velocidades baixas que representam potencial de estagnação hídrica.



**FIGURA 10 – OCORRÊNCIA PERCENTUAL DE BAIXA VELOCIDADE SUPERFICIAL**  
 FONTE: O Autor (2016)

Na porção mais a montante do reservatório (extremo sudeste) estão as afluentes do rio principal (Tibagi) e do segundo maior contribuinte (rio Pitanguí). As vazões de entrada destes representam 95% do total afluente no reservatório, sendo que as velocidades naquela localidade são as maiores observadas, em módulo. Esta característica tem causa também no perfil "encaixado" do curso hídrico naquela região, ou seja, a grande vazão afluente atravessa uma menor seção transversal e, obviamente, as velocidades de escoamento tornam-se maiores ali.

De forma geral, em toda margem esquerda, onde há grandes áreas alagadas, as vazões afluentes são muito pouco representativas.

No arroio do Palmito, por exemplo, a vazão de entrada é 1,41 m<sup>3</sup>/s, enquanto a vazão afluente do rio Tibagi é de 121,26 m<sup>3</sup>/s. Uma vez que o volume hídrico que ocupa aquela área alagada é bastante representativo, a pequena vazão afluente mostra-se incapaz de movimentar este volume. Verificam-se, principalmente, nas áreas afetadas do arroio do Palmito e do arroio do Atalho vetores de velocidade de baixa

intensidade, ao passo que na representação dos módulos de velocidade (Esq.) torna-se difícil a identificação do sentido dos vetores em escala.

No arroio Barroso e no rio Água Comprida, ainda na margem esquerda, forma-se uma menor área de alagamento, considerando que as declividades locais são maiores – tais características são dependentes. Com isto, as velocidades são mais expressivas (em relação aos arroios do Atalho e do Palmito), apesar das baixas vazões. Neste cenário, o resultado apresentado aponta uma maior circulação hidrodinâmica nestas duas localidades, em comparação aos outros afluentes da margem esquerda.

Em toda margem direita, as áreas afetadas têm natureza semelhante (em menor escala) àquelas supracitadas: altas declividades e menores áreas alagadas. Da mesma forma, há uma movimentação maior que as observadas nos arroios do Atalho e do Palmito, apesar das vazões afluentes menos representativas.

Ainda merece destaque a porção próxima a saída do reservatório, junto ao barramento da UHE Santa Branca. A absorção hídrica ocorre na margem esquerda da barragem (onde se encontra a tomada d'água), tornando inevitável a formação de vórtices. Toda vazão afluente da UHE centraliza-se, no cenário de  $Q_{50\%}$ , numa seção lateral menor que seção transversal do rio Tibagi.

Em termos gerais, vê-se a formação de três regiões no reservatório: uma em que o perfil se aproxima do original do rio (do ponto mais a montante até as proximidades do exutório do lajeado da Cotia), outra de transição (do lajeado da Cotia até a foz do arroio do Palmito) e uma última com perfil característico de reservatórios (entre o arroio Palmito e a barragem do empreendimento).

Nas duas primeiras regiões apontadas as velocidades observadas são maiores e o reservatório excede minimamente a calha hídrica principal, ou seja, há poucas áreas alagadas. Desta forma, devido as declividades ali existentes, esperam-se valores de velocidades capazes favorecer as trocas de massas d'água e, portanto, menor potencial de estagnação.

Já no trecho mais característico do reservatório, as áreas alagadas excedem mais significativamente a calha natural do rio. No leito do próprio rio Tibagi, apesar da existência de um grande volume hídrico, as velocidades apresentam capacidade de movimentar as massas d'água. Já nos afluentes da margem esquerda (especialmente arroios do Palmito e do Atalho), onde a vazão afluente é menor e área alagada tem maior abrangência, observa-se maior tendência à estagnação.

Algumas limitações ao modelo geométrico definido surgem, tanto pelas próprias características numéricas da modelagem como pela construção do modelo hidrodinâmico 2DH da UHE Santa Branca. A discussão sobre estas também se configura como importante resultado do trabalho desenvolvido.

Merecem destaque aqui duas atividades prévias aos cálculos que impuseram limitações e imprecisões aos resultados obtidos: a discretização espacial e a batimetria.

Durante a discretização espacial, ou confecção da malha, algumas seções do rio principal foram discretizadas por apenas dois elementos. Devido à posição dos nós, as informações naquela seção se restringem a três pontos. Tal aspecto pode atribuir poucos dados a cada localidade e aumentar a relevância da interpolação - possibilidade também existente em seções transversais maiores com mais elementos. A **FIGURA 11** mostra um trecho do reservatório em que isto ocorre, na localidade alta do reservatório, onde há pouco extravasamento da calha natural do rio.

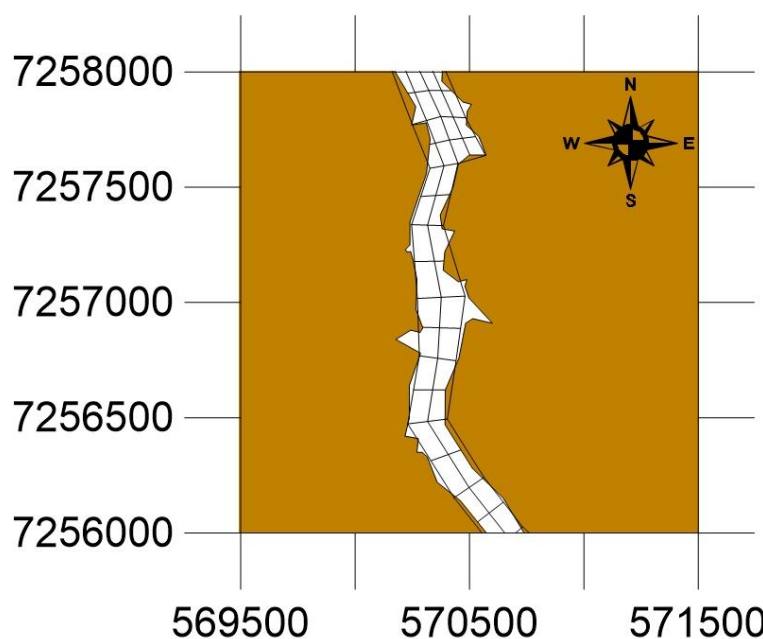


FIGURA 11 – DETALHE DA LIMITAÇÃO NA DISCREIZAÇÃO ESPACIAL  
FONTE: O Autor (2016)

Outra dificuldade observada na construção do modelo geométrico é a reprodução espacial de locais de geometria muito complexa, como curvas acentuadas e trechos sinuosos do corpo hídrico. Em tais locais, a adequação da malha é mais sensível quanto aos ângulos formados entre os elementos, e, conseqüentemente, na reprodução das direções de escoamento. É possível verificar esta dificuldade na **FIGURA 12**.

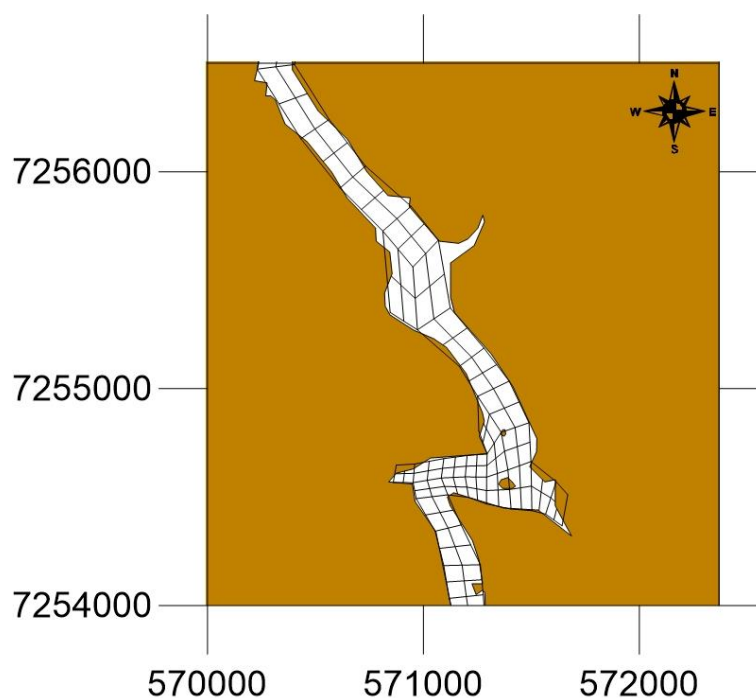


FIGURA 12 – DETALHE DA DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL DE GEOMETRIA COMPLEXA  
 FONTE: O Autor (2016)

Os dados de batimetria são computados em cada ponto da discretização espacial, sendo que tanto o posicionamento como a quantidade de elementos da malha interferem diretamente na nuvem de batimetria a ser formada após interpolação. Em outras palavras, as dificuldades e limitações de discretização espacial estão diretamente relacionadas às dificuldades e limitações da batimetria.

Nos estudos de projeto da UHE Santa Branca, os levantamentos topobatimétricos não cobriram todo o reservatório. Como exposto anteriormente, neste trabalho foram necessárias interpolações sobre quase todo o talvegue dos leitos hídricos com objetivo de bem reproduzir as seções transversais em todo o reservatório. Esta estimação induz aproximações no modelo que podem ser resolvidas e observadas nos resultados gerados.

#### 4.2 TRANSPORTE DE PARTÍCULAS

Com a definição do padrão de circulação, é possível realizar outras modelagens. No próprio SisBaHiA®, como citado anteriormente, foi estudado o transporte de partículas no reservatório através de um modelo lagrangeano.

Vale ressaltar que esta modelagem é dependente daquela desenvolvida anteriormente, sendo que as limitações e imprecisões podem ser levadas adiante. Sendo assim, as análises aqui feitas, apesar de produtivas, requerem certa moderação.

Para um ciclo pré-determinado da modelagem hidrodinâmica simulou-se a movimentação e distribuição de partículas em 400 dias (3.456.000 segundos) em todo o reservatório, através de um modelo de transporte advectivo-difusivo lagrangeano.

Uma boa forma de análise dos resultados aqui obtidos é através do parâmetro "tempo de residência" das partículas por setor do reservatório. Os resultados estão apresentados na **FIGURA 13**.

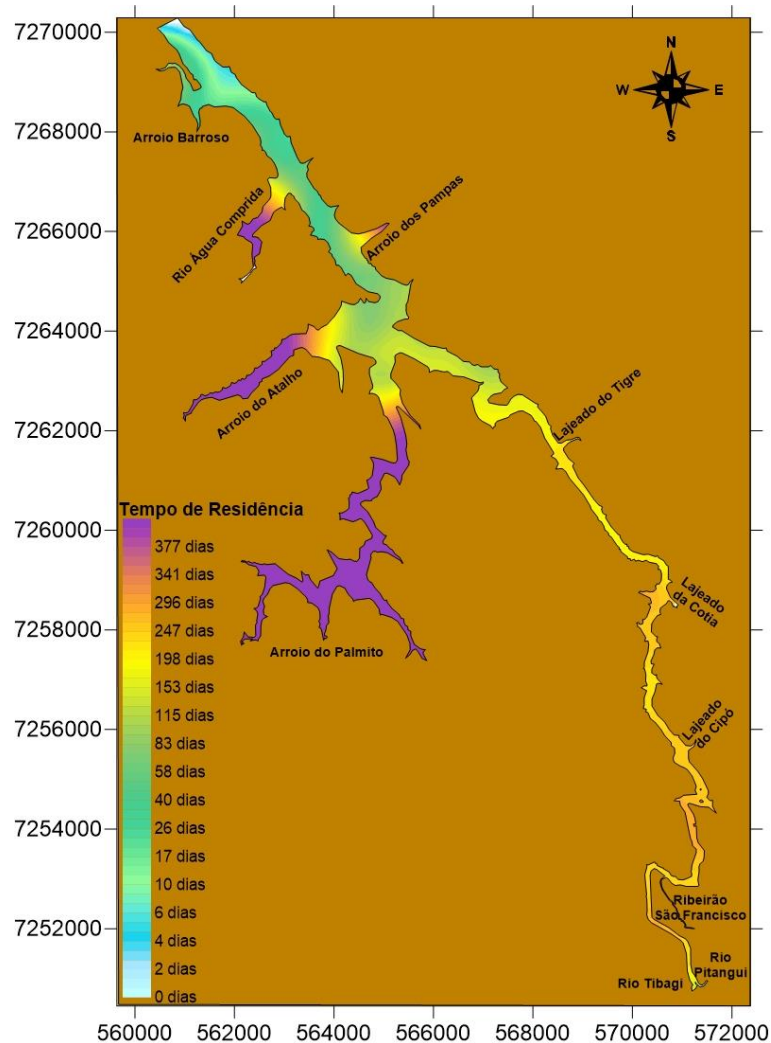


FIGURA 13 – TEMPO DE RESIDÊNCIA DO RESERVATÓRIO  
FONTE: O Autor (2016)

Verifica-se que a localidade apontada com alto potencial de estagnação tem tempos de residência próximos ao intervalo de tempo modelado (400 dias) - arroio do Palmito e arroio do Atalho. Além disso, o rio Água Comprida também se enquadra no grupo das áreas de maior estagnação.

É também notório que no leito do rio principal os tempos de residência diminuem conforme a proximidade com o barramento. A influência lateral da margem esquerda é oposta à exercida pela margem direita: no trecho característico de reservatório no rio Tibagi, a porção hídrica à esquerda tem maiores tempo de residência pela

proximidade com as áreas de estagnação - contrariamente às porções próximas aos afluentes da margem direita.

Outro estudo aqui se faz através do lançamento de traçadores no reservatório. Assim, torna-se possível estudar como as massas d'água se deslocam com maior precisão.

O cenário estudado buscou identificar a mistura existente em todo reservatório. Na FIGURA 19 observa-se a distribuição de partículas após 1 dia modelagem e na FIGURA 20 observa-se a distribuição após 200 dias. As partículas azuis são aquelas inseridas no reservatório e as vermelhas, aquelas que saíram pela barragem.

Após metade do tempo total modelado (200 dias), verifica-se grande concentração de partículas nos afluentes da margem esquerda. Esta constatação corrobora as análises prévias e aponta maior preocupação para a gestão dos recursos hídricos para os corpos hídricos: rio Água Comprida, arroio do Atalho e arroio do Palmito.

#### 4.3 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A sobreposição das informações e interesses sobre os usos e os potenciais usos do reservatório da UHE Santa Branca é o resultado do desfecho deste trabalho.

Os produtos da modelagem da circulação hidrodinâmica apontam áreas de menor mobilidade hídrica e conseqüente maior restrição quanto ao uso hídrico, uma vez que grande parte dos usos d'água requerem boa qualidade do recurso. Por outro lado, da mesma forma, áreas em que a circulação hidrodinâmica não seja modificada, os usos realizados e pretendidos poderão se dar normalmente. Além disso, trata-se aqui dos potenciais que surgem a partir das modificações impostas pelo reservatório.

Na área A (referenciada no item 3.3 deste documento) estão as áreas mais sensíveis na expectativa de deterioração da qualidade das águas - onde situam-se as áreas afetadas dos arroios Palmito e Atalho e do rio Água Comprida. Nestas localidades foram identificadas, no diagnóstico socioeconômico do EIA/RIMA, esporádicos usos de ranchos para lazer pessoal dos proprietários/moradores e raras áreas de des-sedentação animal. Tais usos não deverão ser obrigatoriamente restringidos pelas características hidrodinâmicas do reservatório ali.

Espera-se que a qualidade da água seja menor nesta localidade e que haja possibilidade maior de eutrofização. Entretanto, os impactos socioeconômicos esperados devem considerar a subutilização atual dos recursos hídricos disponíveis.

Por outro lado, a formação do reservatório aumentará o perímetro hídrico e ampliará a possibilidade de novos acessos. Em propriedades em que não havia uso hídrico o potencial deve surgir, assim como podem ser ampliados aqueles mínimos interesses existentes. Tal expectativa sensibiliza ainda mais a região identificada com maior potencial de estagnação hídrica.

Nestes cenários, usos comerciais ganham destaque apesar dos proprietários não terem apontado interesse neste sentido, até então.

Já as localidades de maior uso atual dos recursos hídricos, identificadas anteriormente como área B e área C, merecem destaque pela pouca interferência do reservatório. Por se tratar da parte mais alta (ou final) do reservatório, nestas localidades a influência do mesmo passa a ser pouco relevante, sendo que este trecho do reservatório fora identificado na modelagem hidrodinâmica por seu "perfil semelhante" ao rio em sua naturalidade.

No que tange às permissões e restrições aos usos hídricos, cita-se que nestas localidades o represamento mínimo das águas ainda deve favorecer o aproveitamento do recurso. Uma vez que a operação do reservatório, com seu mínimo deplecionamento, deverá regularizar as flutuações de nível d'água, e em um período maior do ano espera-se que haja volume hídrico para atividades de lazer e exploração comercial, como interesse apontado anteriormente nestas duas áreas.

Os acessos às áreas B e C não deverão ser significativamente ampliados, visto que o alagamento mínimo nestas localidades não amplia significativamente o perímetro do corpo hídrico.

Por fim, a área denominada "D" tem análise diferente das já feitas. Por se tratar de uma localidade de pouco alagamento, além de menor potencial e interesse de exploração dos recursos hídricos, espera-se, ao menos em princípio, poucas modificações da circulação hidrodinâmica e nos usos múltiplos do reservatório.

Obviamente surge um novo chamariz para atividades não vislumbradas anteriormente, como em todo perímetro do reservatório, que poderá ser explorado.

Globalmente, sobretudo, o panorama da circulação hidrodinâmica transpassa interesses socioeconômicos e ambientais.

O estabelecimento das Áreas de Preservação Permanente (APPs) ao redor do reservatório, por exemplo, devem limitar o acesso e uso desregrado dos recursos

hídricos, visando proteção aos ecossistemas aquáticos. Planeja-se, conforme indicado no EIA/RIMA da UHE Santa Branca, um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) ao redor do reservatório com o restabelecimento de vegetação nativa. Esta deverá funcionar como um filtro para o lago, distanciando atividades humanas do mesmo, e evitando danos à qualidade das águas e à biota aquática.

Outro programa socioambiental já citado, o PACUERA, também deverá ser desenvolvido na sequência dos estudos socioambientais da UHE no sentido de mapear todo perímetro do reservatório e garantir uso sustentável do mesmo. Conforme Resolução CONAMA 302/2002, inclusive se faz necessária consulta pública na construção do PACUERA, que precede aprovação do mesmo.

Segundo a mesma referência normativa, a área total de uso do entorno do reservatório poderá ter até 10% utilizada para polos de turismo e lazer. No caso em pauta, as áreas B e C deverão ser inseridas neste percentil sem grandes sensibilidades, pois o modelo de circulação hidrodinâmica não demonstra alto potencial de deterioração da qualidade das águas ali. Já nas proximidades dos afluentes de maior potencial de estagnação (área A), para que as localidades individuais sejam delimitadas como polos de lazer e turismo se faz necessário estudo aprofundado durante elaboração do PACUERA - visto que a preservação da vegetação marginal tem maior importância nesta região.

Outro tema ambiental bastante relevante neste cenário é a remoção da vegetação a ser suprimida pelo reservatório.

A quantidade ideal de biomassa afogada pelas águas do reservatório nem sempre é nula. Por motivos logísticas, riscos humanos, inviabilidade econômica e, inclusive, razões socioambientais, comumente se modela a qualidade das águas de futuros reservatórios para cenários de supressão de 100% da vegetação a ser afogada e outros percentuais menores. A partir dos resultados, chega-se a uma quantidade ideal de supressão, com apontamento das áreas de biomassa que poderão ser alagadas sem maiores danos ambientais.

Tal discussão é importante pois também pode impactar os usos múltiplos do reservatório e é alicerçada pelos resultados obtidos no modelo de circulação hidrodinâmica do mesmo. Em áreas de afogamento de biomassa há risco maior de eutrofização, além de riscos às atividades de lazer (como galhos e troncos soltos no reservatório).

Para a UHE Santa Branca, cabe estudo posterior que some como variável nesta complexa teia socioambiental o uso do solo atual e futuro do reservatório. Onde há maior quantidade de florestas densas, por exemplo, há maior sensibilidade nos serviços de supressão vegetal e, conseqüentemente, maior vulnerabilidade à deterioração da qualidade das águas.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise central pretendida pelo estudo aqui desenvolvido tem finalidade científica e acadêmica por concepção. A modelagem da circulação hidrodinâmica do reservatório da UHE Santa Branca é um serviço reconhecidamente necessário e certamente deverá ser realizado em etapa posterior no licenciamento ambiental do empreendimento. Este serviço, por sua vez, terá enfoque técnico-comercial principalmente.

As discussões que são feitas no presente estudo visaram atendimento dos objetivos traçados anteriormente: estudo da dinâmica fluvial do reservatório através de modelagem computacional e utilização dos resultados para avaliar os potenciais usos múltiplos das águas do reservatório da UHE Santa Branca.

Conforme discutido, a eficácia das análises é limitada pelas imprecisões inerentes dos métodos utilizados, somadas àquelas produzidas no desenvolver no trabalho. Destaca-se que, tais limitações não impossibilitaram os diagnósticos e prognósticos realizados. Os produtos, de forma geral, apontam resultados que reforçam a importância da utilização da modelagem da circulação hidrodinâmica como ferramenta de gestão socioambiental, especialmente em empreendimentos hidrelétricos com reservatórios.

Reconhece-se que para uma avaliação completa do complexo sistema que envolve uma obra hidrelétrica e o uso de seu reservatório requer-se tempo e recursos maiores, todavia a modelagem de circulação hidrodinâmica (assim como as etapas que levam até a mesma) é fase básica e fundamental para os desdobramentos, como a modelagem da qualidade da água.

Para aprimoramento dos métodos aqui desenvolvidos e atendimento dos mesmos objetivos, identificam-se as seguintes possibilidades: ampliação no levantamento de dados batimétricos, aprimoramento da discretização espacial, avaliação de outros cenários de vazão permanente, avaliação de outros cenários conforme sazonalidade hidrológica, detalhamento da região próxima à barragem da UHE, ampliação das análises sobre os modelos de transporte lagrangeano etc. Já como desdobramento e ampliação dos objetivos traçados neste estudo, também existem possibilidades, como a modelagem da qualidade da água e análise de percentuais de supressão vegetal no reservatório (deterioração da biomassa afogada).

Uma vez que a UHE Santa Branca é empreendimento de destaque na região em que se insere, entende-se que os resultados aqui obtidos somam nas discussões, análises e estudos que cercam o mesmo, além de seu enfoque acadêmico principal.

A integração, cada vez mais comum, de ferramentas computacionais às problemáticas socioambientais tendem a dar maior publicidade e popularizar temas importantes para sociedade, no caso em pauta: chamar atenção para os potenciais usos do reservatório da UHE Santa Branca, sob ótica ambiental, social e econômica.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBUD, O. A. **Por que hidrelétricas (com reservatório) são a melhor opção para o Brasil?** Brasília, 2012. Disponível em <<http://www.brasil-economia-governo.org.br/wp-content/uploads/2012/07/por-que-hidreletricas-com-reservatorio-sao-a-melhor-opcao-para-o-brasil.pdf>>. Visitado em setembro de 2016.

AGNOLIN, G. L.; WINCLER, S.; RENK, A.; **Disputas e debates em torno do PACUERA do reservatório da UHE Foz do Chapecó.** Chapecó, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, 2016. Disponível em <<https://www.unochapeco.edu.br/static/data/portal/downloads/1544.pdf>>. Visitado em setembro de 2016.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2015.** Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2015.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 08 de janeiro de 1997- Política Nacional de Recursos Hídricos.

CALIJURI, M. C. et al. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão.** Edição Única. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CHAMON - Chamon Participações e Administração de Bens Próprios Ltda. **Relatório Ambiental Simplificado CGH Vitória.** Curitiba, Instituto Ambiental do Paraná, 2013. Disponível em <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2013\\_RAS/RAS\\_-\\_CGH/RAS\\_CGH\\_Vitoria.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/2013_RAS/RAS_-_CGH/RAS_CGH_Vitoria.pdf)>.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 203**, de 20 de março de 2002.

CORRÊA, G. P. **Aplicação Do Modelo De Qualidade De Água Sisbahia No Reservatório Do Rio Verde**, RMC/PR. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2013. Disponível em <<http://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/36169>>. Visitado em setembro de 2016.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2004.** Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2005.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030.** Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2007.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção da Demanda de Energia Elétrica: para os próximos 10 anos (2015- 2024).** Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2015.

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. **Conceitos e importância da modelagem matemática de qualidade da água para gestão dos recursos hídricos.** Guarapuava, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013. Disponível em <<http://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/2086>>. Visitado em setembro de 2016.

GIACCHINI, B. L. **Uma boa introdução ao Método dos Elementos Finitos.** Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Disponível em <[http://www.mat.ufmg.br/~rodney/notas\\_de\\_aula/elementos\\_finitos.pdf](http://www.mat.ufmg.br/~rodney/notas_de_aula/elementos_finitos.pdf)>. Visitado em setembro de 2016.

GOBIRA, A. B. **Modelagem do espalhamento de óleo em águas rasas.** Vitória, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008. Disponível em <[http://www.prh29.ufes.br/arquivos\\_downloads!TCC/2007/alice%20barboza%20go](http://www.prh29.ufes.br/arquivos_downloads!TCC/2007/alice%20barboza%20go)>.

bra%20.%20GRA\_AMB%20.%20MODELAGEM%20DE%20ESPALHA-  
MENTO%20DE%20%C3%93LEO%20EM%20%C3%81GUAS%20RASAS.pdf>. Visi-  
tado em setembro de 2016.

HIDRELÉTRICA SANTA BRANCA - Hidrelétrica Santa Branca S.A. **Estudo de Impacto Ambiental: UHE Santa Branca**. Curitiba, Instituto Ambiental do Paraná, 2015. Disponível em <<http://www.iap.pr.gov.br/pagina-646.html>>. Visitado em setembro de 2016.

JORNAL BOA VISTA - JBV. **Pacuera incentiva o turismo regional**. Erechim, 2016. Disponível em <<http://ljbvonline.com.br/site/noticia/48620/pacuera-incentiva-o-turismo-regional>>. Visitado em setembro de 2016.

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. **Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial - PACUERA: Usina Hidrelétrica Mauá**. Curitiba, 2010. Disponível em <[http://consorciocruzeirodosul.com.br/upload/tiny\\_mce/arquivos/meio\\_ambiente/PacueraNolume11-A\\_Zoneamento\\_e\\_Plano\\_de\\_Gerenciamento\\_UHE\\_Maua\\_NOVO.pdf](http://consorciocruzeirodosul.com.br/upload/tiny_mce/arquivos/meio_ambiente/PacueraNolume11-A_Zoneamento_e_Plano_de_Gerenciamento_UHE_Maua_NOVO.pdf)>. Visitado em setembro de 2016.

LARENTIS, D. G. **Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: Sistema Taquari-Antas - RS**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3900>>. Visitado em setembro de 2016.

MACEDO, C. F.; SIPAÚBA-TAVARES, L. H. **Eutrofização e qualidade da água na piscicultura: consequências e recomendações**. São Paulo, 2010. Disponível em <[ftp://ftp.sp.gov.br/ftppe Pesca/36\\_2\\_149-163rev.pdf](ftp://ftp.sp.gov.br/ftppe Pesca/36_2_149-163rev.pdf)>. Visitado em setembro de 2016.

PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Usos Múltiplos das Água Superficiais**. Curitiba, 2016. Disponível em <<http://www.meioambiente.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=87>>. Visitado em setembro de 2016.

ROCHA, J. C.; CARTAXO, E. F. **Impactos Ambientais na Qualidade da Água de Reservatórios de Hidrelétricas na Amazônia**. Manaus, Universidade Federal do Amazonas 51º Congresso Brasileiro de Química, 2011.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA®**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <[http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA\\_RefTec\\_V9a.pdf](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V9a.pdf)>. Visitado em setembro de 2016.

ROSMAN, P. C. C. **Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001. Disponível em <[http://www5.ensp.fiocruz.br/biblioteca/dados/MNRH5\\_PCCRosman.pdf](http://www5.ensp.fiocruz.br/biblioteca/dados/MNRH5_PCCRosman.pdf)>. Visitado em setembro de 2016.

SÃO PAULO (Estado). **Secretaria de Energia e Mineração do Estado de São Paulo. Estudo mostra necessidade de contratar 4 GW nos dois leilões de reserva deste ano**. São Paulo, 2016. Disponível em <<http://www.energia.sp.gov.br/2016/08/estudo-mostranecessidade-de-contratar-4-gw-nos-dois-leiloes-de-reserva-deste-ano/>>. Visitado em setembro de 2016.

SOTO, Y. J. M. **A Modelagem Hidrodinâmica como Apoio a Tomada de Decisão em Caso de Derrame de Óleo na Parte Interna do Complexo Estuarino Antonina-Paranaguá-PR**. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2004. Disponível em <[http://www.ppgerha.ufpr.br/publicacoes/dissertacoes/files/087-Yatsen\\_Jepthe\\_Maldonado\\_Soto.pdf](http://www.ppgerha.ufpr.br/publicacoes/dissertacoes/files/087-Yatsen_Jepthe_Maldonado_Soto.pdf)>. Visitado em setembro de 2016.