

PLANO DE TRABALHO – TRANSPOSIÇÃO DE VAZÕES DO PARAÍBA DO SUL

TRANSPOSIÇÃO DE VAZÃO

PLANO DE TRABALHO

Preparado para:

AGEVAP

12/2011

VERSÃO 1

PSR

Sumário

1. Introdução	1
2. Detalhamento da Metodologia	2
2.1. Levantamento de informações e montagem do banco de dados	2
2.2. Análise de consistência dos dados	3
2.3. Demandas atuais e futuras	3
2.4. Estudos hidrológicos	8
2.5. Estudos de qualidade da água	9
2.6. Estudos de modelagem dos reservatórios e captações	26
3. Fluxograma	38
4. Cronograma	39
5. Conclusão	40
5.1. Cenários de reservatórios e de geração hidrelétrica	40
5.2. Dificuldades na obtenção de dados	47

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do documento é apresentar o detalhamento do Plano de Trabalho contido na Proposta Técnica referente ao Ato Convocatório nº 18 publicado pela AGEVAP, procurando, como solicitado no Termo de Referência, descrever:

- a. O detalhamento da metodologia e das etapas a serem desenvolvidas; e
- b. O acompanhamento do grupo de trabalho constituído no âmbito da Câmara Técnica Consultiva do CEIVAP.

Nesse documento são apresentados os marcos, produtos e reuniões para discussão dos resultados e as principais dificuldades de obtenção de dados para atendimento dos produtos esperados e para escala de trabalho solicitada.

2. DETALHAMENTO DA METODOLOGIA

Nesse item são apresentados as diversas atividades e os procedimentos para sua execução.

2.1. Levantamento de informações e montagem do banco de dados

Para o trabalho de avaliação hidrológica e hidráulica de uma bacia hidrográfica as principais dificuldades geralmente residem nos seguintes elementos básicos:

- Dados hidrométricos nos diversos trechos de interesse, isto é: dados limnimétricos, dados de vazão e relações cota-descarga nos postos;
- Dados cartográficos e topobatimétricos nos trechos onde se terá que executar as modelagens de rio e reservatórios;
- Dados dos reservatórios e das captações existentes;
- Dados dos futuros reservatórios e captações.
- Levantamentos de Bases Cartográficas e imagens disponíveis no IBGE, DSG, SPU, INEA, IGAM, DAEE, prefeituras, etc.;
- Séries de níveis d'água e vazões, curva-chave, medições de descarga de estações fluviométricas localizadas ao longo do rio Paraíba do Sul e de seus principais afluentes;
- Estudos existentes de regionalização de vazões, de consistência de dados e de cálculo de disponibilidade hídrica para fins de outorga;
- Cálculo de usos da água, como os realizados pelo Operador Nacional do Sistema-ONS;
- Séries de parâmetros de qualidade da água, das estações localizadas ao longo do rio Paraíba do Sul e de seus principais afluentes;
- Estudos existentes de qualidade da água no trecho de interesse que contenham informações a respeito da base de dados, diagnósticos e prognósticos e modelagem de qualidade da água, como os realizados pela Cetesb e Inea;
- Planos de recursos hídricos realizados para a bacia;
- Estudos de inventário e projeto básico de PCH's e UHE's localizadas no rio Paraíba do Sul;
- Avaliação Ambiental Integrada dos aproveitamentos hidrelétricos da bacia do rio Paraíba do Sul, como o realizado pela Empresa de Planejamento Energético – EPE;
- Estudos existentes de modelagem hidrodinâmica do rio Paraíba do Sul;
- Estudos de Impacto Ambiental, como o da UHE Simplício;
- Levantamentos topobatimétricos existentes para os estirões a serem modelados;
- Mapeamento dos usos do solo na bacia; e

- Dados socioeconômicos para as projeções de demanda.

A estratégia básica será obter uma base de dados confiável e consistente e focada na resolução desses problemas, com uso de:

1. Base de dados da NASA, SRTM, para corroborar as informações coletadas e suprir eventuais inconsistências;
2. Os dados hidrométricos serão avaliados e sua consistência verificada antes de iniciar a modelagem;

No caso da modelagem da qualidade da água, além dos dados fisiográficos e hidrométricos, será necessário obter dados de análise da água.

Um dos pontos principais para a realização da modelagem hidrodinâmica é a base de dados cartográficas e topobatimétricas, e a ausência destas informações implica em grande dificuldade para este fim.

2.2. Análise de consistência dos dados

Após a coleta de dados cartográficos, hidrométricos e dos projetos de captação será feita uma análise de consistência dos mesmos, isto é, das curvas-chave, e das séries de vazões.

Essa análise permitirá a composição de uma base de dados confiável e consistente para que se possa executar as modelagens, bem como, a avaliação dos projetos permitirá a identificação dos pontos críticos para a elaboração da modelagem, e suas dificuldades.

Essa avaliação permitirá identificar as falhas de dados a serem preenchidas, bem como a suficiência dos dados dos projetos previstos e das obras existentes, como, por exemplo, as informações dos reservatórios(Funil, Santa Branca, etc...), e das captações.

2.3. Demandas atuais e futuras

Nesse caso, as dificuldades referem-se à obtenção das outorgas e demandas para diversos usos em diversos cenários.

Nesse sentido, será prioridade a definição das vazões associadas às demandas dos diversos usos consuntivos e não consuntivos, sendo utilizada como base, um estudo da ONS e da ANA, tendo em vista a finalidade de interesse em sendo o uso futuro (prospecção).

Conforme descrito ao longo do texto, as demandas futuras serão calculadas para o cenário atual e para os cenários futuros com base em projeções de população, e projeções socioeconômicas das bacias de interesse, sempre no intuito de avaliar o potencial de uso futuro. Dito isso, serão apresentados os cenários: atual e dois para futuro (10 e 20 anos) – no final serão 06 cenários – os três (atual, 10 e 20 anos) com ou sem transposição. A seguir, descreve-se a metodologia para diagnóstico dos usos.

2.3.1. Usos consuntivos

São denominados usos consuntivos aqueles para os quais se retira ou capta água na bacia hidrográfica e que parte é consumida e não retorna para a mesma.

Na maior parte das bacias hidrográficas brasileiras, ainda não estão implantados sistemas de gestão dos recursos hídricos e de outorgas, possíveis facilitadores do estudo, no entanto, observa-se que a ANA utiliza-se de vazões de referência para concessão de outorga no rio Paraíba do Sul;

A obtenção das outorgas concedidas será o primeiro passo neste trabalho, com respectiva aferição dos usos em diversos cenários.

Os métodos de estimativa possuem algumas diferenças conceituais que podem ser percebidas nas metodologias adotadas, a seguir resumidas.

Serão consideradas vazões de retirada, de retorno e de consumo definidas como:

- vazão de retirada – é o somatório das vazões captadas pelos municípios e agregadas para as bacias de contribuição de cada aproveitamento hidrelétrico (incluindo, também, as captações nos próprios reservatórios), para atividades de uso consuntivo da água;
- vazão de retorno – é o somatório das vazões lançadas pelos municípios e agregadas para as bacias de contribuição de cada aproveitamento hidrelétrico, decorrentes de despejo de parcela remanescente da vazão de retirada para atividades de uso consuntivo da água (parcela não consumida da vazão de retirada); e
- vazão de consumo – é o somatório das diferenças entre as vazões de retirada e de retorno, nas bacias de contribuição de cada aproveitamento hidrelétrico.

As categorias de uso consuntivo abordadas serão:

1. irrigação;
2. abastecimento urbano;
3. abastecimento rural;
4. criação animal; e
5. abastecimento industrial.

2.3.1.1. Irrigação

Os parâmetros necessários para a obtenção da vazão de retirada para irrigação se baseiam na avaliação das seguintes informações básicas:

- Área Irrigada (A_i);
- Evapotranspiração real das culturas (ET_{rc});
- Precipitação efetiva (P_{ef}); e

- Eficiência de Aplicação (Ea) dos sistemas de irrigação

A metodologia adotada neste estudo para definição de cada uma dessas variáveis bem como para a construção dos cenários futuros, que nesse caso significa estimar o crescimento da área irrigada em cada município, com base nos Censos Agropecuários do IBGE.

- **Estimativa da evapotranspiração**

O termo evapotranspiração foi utilizado pela primeira vez por THORNTHWAITE (1944), para expressar a ocorrência simultânea da evaporação e da transpiração com uma comunidade vegetal de pequeno porte que cobre totalmente o solo.

Segundo THORNTHWAITE e HARE (1965), citados por VAREJÃO-SILVA (2000), Thornthwaite introduziu o termo evapotranspiração potencial (ETp) com o objetivo de estabelecer um parâmetro comparativo, definindo-o como a perda de água por parcela de solo úmido, totalmente revestida de vegetação e suficientemente extensa para eliminar o efeito oásis.

PENMAN, em 1956, citado por TANNER & PELTON (1960), modificou um pouco o conceito original de evapotranspiração potencial, definindo-a como sendo a quantidade de água transpirada na unidade de tempo, a partir de uma vegetação rasteira e verde, recoberto totalmente o solo, com altura uniforme e sem jamais sofrer limitações hídricas.

BERNARDO (1989) definiu:

- Evapotranspiração de Referência (ET_o) como sendo a evapotranspiração de uma superfície extensiva, totalmente coberta com grama de tamanho uniforme, com 8 a 15 cm de altura e em fase de crescimento ativo, em solo com ótimas condições de umidade;
- Evapotranspiração Potencial da Cultura (ET_{p_c}) como a evapotranspiração de determinada cultura quando há ótimas condições de umidade e nutrientes no solo, de modo a permitir a produção potencial dessa cultura nas condições de capacidade de campo; e
- Evapotranspiração Real da Cultura (ET_{rc}) como a quantidade de água evapotranspirada por uma determinada cultura, sob condições normais de cultivo, isto é, sem a obrigatoriedade de o teor de umidade do solo permanecer próximo da capacidade de campo.

As séries de vazões para a irrigação obtidas no presente estudo terão como base a ET_{rc}, com a ETo estimada pelo método de Penman–Monteith–FAO. Para isso serão utilizados os seguintes parâmetros meteorológicos:

- Temperatura média (°C);
- Umidade relativa (%);
- Velocidade do vento (m/s);
- Insolação (h).

Os parâmetros serão obtidos das Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, dos períodos de 1931 a 1960 e 1961 a 1990. Como a irrigação passou a ser relevante a partir da década de 60, as Normais do período 1961 a 1990 foram adotadas nas esta-

ções em que estavam disponíveis. As do período 1931 - 1960 foram utilizadas nas estações em que não se dispunha de Normais calculadas para 1961 a 1990. Além dos dados das Normais, e tendo como objetivo adensar a malha de estações poderão ser selecionadas algumas estações entre aquelas cujos dados estão disponíveis na ANA (com dados do período 1961 a 1978).

- **Estimativa da precipitação efetiva**

A precipitação efetiva será obtida com base na metodologia estabelecida pelo United Soil Department of Agricultura -USDA, descrita por DOORENBOS & PRUIT (1992) no Boletim FAO nº 24, a qual incorpora alterações no comportamento da infiltração, em função da quantidade de água disponível no solo no momento da precipitação. Valores de precipitação efetiva foram então obtidos tendo-se como parâmetros de entrada a precipitação mensal observada e a evapotranspiração potencial da cultura.

- **Estimativa da vazão de consumo e de retorno de irrigação**

A estimativa da vazão de retirada para a irrigação terá como base, para os municípios pertencentes à bacia, o balanço hídrico mensal dado pela equação:

$$Q_i = (A_{i,m} \times (ET_{0m} \times K_{c,m,m} + K_s) - P_{ef,m}) \times 10 / E_{a,m,m};$$

Onde:

- Q_i = vazão de retirada para irrigação por município, em $m^3/mês$;
- $A_{i,m}$ = área total de cultivo do município por mês e por hectare;
- ET_{0m} = Evapotranspiração potencial no município por mês;
- K_{cm} = Coeficiente dos cultivos;
- $K_{s,m}$ = Coeficiente de umidade do solo;
- $P_{ef,m}$ = Precipitação efetiva no mês;
- $E_{a,m}$ = Eficiência de aplicação.

2.3.1.2. Abastecimento urbano

Para a estimativa da vazão de retirada para o abastecimento urbano serão processados os dados dos censos demográficos com a determinação, para cada município contido em cada área de drenagem, das populações totais e urbanas do município e da população atendida pelo Sistema Público de Abastecimento de Água.

Em seguida, será feita a determinação do consumo per capita de cada Estado, para o ano de 2000, relacionando-se as informações contidas na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB (IBGE, 2000) referentes ao volume distribuído em cada município, com as dos censos demográficos do IBGE, relativas ao número de domicílios atendidos pelo Sistema Público de Abastecimento de Água e ao número de habitantes por domicílio.

2.3.1.3. *Abastecimento rural*

Para o abastecimento rural considerar-se-á, além da população rural, também a urbana não atendida.

No cálculo das vazões serão utilizados, no caso das populações rurais e urbanas não atendidas por rede geral, os coeficientes de retirada rural per capita. Portanto, serão consideradas que as duas parcelas tendem a se abastecer de água de forma semelhante. No caso da população rural atendida por rede geral, serão utilizados os mesmos per capita da população urbana.

A estimativa da vazão retirada para abastecimento rural, por município, será feita pela equação:

$$Q_r = (\text{Pop}_{r,na} + \text{Pop}_{u,na}) \times CP_{rur} + \text{Pop}_{r,a} \times CP_{(Fxn)}, \text{ onde:}$$

- Q_r = vazão retirada para abastecimento rural por município, l/dia;
- $\text{Pop}_{r,na}$ = população rural do município não atendida por rede geral, habitantes;
- $\text{Pop}_{r,a}$ = população rural do município atendida por rede geral, habitantes;
- $\text{Pop}_{u,na}$ = população urbana do município não atendida por rede geral, habitantes;
- CP_{rur} = vazão per capita rural em l/hab.dia considerando o Estado em que se insere o município ;
- $CP_{(Fxn)}$ = vazão per capita urbana em l/hab.dia considerando o Estado e a faixa populacional do município.

2.3.1.4. *Abastecimento para a criação animal*

A estimativa da série de vazões destinadas para a criação animal será feita a partir do número de cabeças, disponível nos Censos Agropecuários do IBGE dos anos de 1940, 1950, 1960, 1970, 1975, 1980, 1985 e 1995 / 1996. Para os anos anteriores a 1940 adotou-se uma extrapolação com a tendência observada entre os censos de 1940 e 1950. Nos anos posteriores a 1996, extrapolação-se a tendência observada entre 1985 e 1996.

Foram processados os dados censitários com a determinação, para os municípios contidos em cada uma das áreas de drenagem, da população correspondente aos principais rebanhos nacionais.

A estimativa da vazão retirada para criação animal por município foi feita pela equação:

$$Q_a = \sum (\text{Reb}_{(esp\ anim)} \times q_{(esp\ anim)}, \text{ onde :}$$

- Q_a = vazão retirada para abastecimento animal por município, l/dia;
- $\text{Reb}_{(esp\ anim)}$ = rebanho do município para cada espécie animal obtida dos censos do IBGE;
- $q_{(esp\ anim)}$ = vazão per capita por espécie animal, l/animal. dia.

2.3.1.5. *Abastecimento industrial*

A metodologia adotada para estimativa das séries de vazões relacionadas ao abastecimento industrial consistirá de um processo em que é levado em consideração o valor da produção industrial municipal, a quantidade produzida por tipo de indústria no ano de 2001 e a relação entre essa quantidade e o volume de água necessário à produção de cada unidade – função do processo industrial adotado.

Serão utilizados:

- Censos Industriais: 1940, 1950, 1960, 1970, 1975, 1980 e 1985; e
- Pesquisa Industrial Anual: 1990 1995 e 2001.

Assim, a estimativa da vazão de retirada para abastecimento industrial no município, dada pelo somatório das vazões demandadas por cada classe de indústria presente, será feita pela equação:

$$Q_p = \sum (VP_{(\text{produto } y)} \times V_{\text{retirada}(\text{produto } y)})/31.536.000, \text{ onde:}$$

- Q_p = vazão total de retirada para abastecimento industrial em m^3/s ;
- $VP_{(\text{produto } y)}$ = valor da produção do produto y , convertido para US\$;
- $V_{\text{retirada}(\text{produto } y)}$ = volume captado por unidade monetária produzida do produto y , $m^3/US\$$.

2.3.2. Usos não consuntivos

Os usos não consuntivos são aqueles em o uso dos recursos hídricos não alteram sua quantidade ou qualidade, tais como lazer e turismo, pesca, geração hidrelétrica, e navegação.

Esses usos serão levantados em cada trecho para avaliação das restrições que deverão ser incorporadas a modelagem, como por exemplo vazões para garantir esportes náuticos (como “rafting”), ou paisagem cênica.

2.4. Estudos hidrológicos

Os estudos hidrológicos deverão possibilitar gerar séries de vazões afluentes a cada um dos pontos de interesse ao estudo e deverão ser compostos por períodos comuns consistentes nos postos selecionados na bacia, por seu histórico e pela qualidade de seus dados.

Nesse trabalho serão desenvolvidas as seguintes atividades:

1. Análise de consistência das séries e seleção dos postos;
2. Avaliação das curvas-chave e curvas de permanência;
3. Preenchimento de falhas;
4. Estudos de regionalização de vazões; e
5. Estudos estatístico e avaliação dos cenários e riscos de não atendimento.

2.5. Estudos de qualidade da água

Primeiramente será feita uma compilação dos dados de qualidade da água do Rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes na região de interesse. Estes dados servirão para dois propósitos distintos:

- Diagnóstico da qualidade da água do rio e de reservatórios.
- Uso dos dados como condições iniciais e de contorno para um modelo de qualidade da água do rio e dos reservatórios.

Será feita uma avaliação da consistência dos dados de qualidade da água para se eliminar eventuais erros grosseiros.

Os dados existentes de qualidade da água serão avaliados à luz das vazões do rio para que se possa compreender se existe uma correlação entre qualidade e eventos de precipitação/vazão elevada.

Havendo disponibilidade de dados, serão construídos dois cenários de condições de contorno e cargas na modelagem de qualidade da água:

- i. Valores médios dos parâmetros.
- ii. Valores extremos parâmetros.

Os dados de vazão/velocidade média e dos parâmetros hidráulicos das seções do rio Paraíba do Sul serão utilizados como parâmetros de entrada do modelo de qualidade da água. Valores de dispersão e difusão turbulenta para os espécimes na modelagem de qualidade da água serão estimados a partir da hidráulica e da hidrodinâmica já obtida.

Será construído um modelo específico de qualidade da água para o canal principal, incluindo os principais afluentes no trecho a ser estudado. Além disso, serão feitas considerações com relação aos reservatórios. Em casos onde for possível, o reservatório será modelado como um corpo bem misturado, ou como um corpo lântico unidimensional.

Se, em algum reservatório, houver necessidade e dados suficientes, poderá ser feita uma implementação bidimensional do modelo.

Além disso, sabe-se que a presença de algas e bactérias cianofíceas é o principal problema da bacia do rio Paraíba do Sul, tendo em vista a quantidade de reservatórios para geração de energia elétrica combinado com a precariedade do saneamento básico.

Para o planejamento futuro do uso da água da Bacia, no que consiste a qualidade da água, os parâmetros biológicos deverão ser considerados como prioritários na modelagem da qualidade da água.

Nesse contexto, os parâmetros de qualidade modelados contemplarão não somente a questão físico-química, mas também biológica, conforme apresentado a seguir:

- Oxigênio dissolvido;

- Demanda bioquímica de oxigênio;
- Clorofila-a;
- Zooplâncton;
- Amônia;
- Nitrato;
- Nitrogênio orgânico;
- Fosfato;
- Fósforo orgânico.

A cinética química usada será o estado da arte em modelagem de qualidade de águas e de eutrofização nos modelos comerciais e públicos (por exemplo, os usados pela EPA nos EUA) existentes. A teoria usada se encontra abaixo.

Como se verá ao longo do texto observações de alguns parâmetros, como fósforo, nitrogênio, amônia, entre outros precisarão estar disponíveis para que se possa simular o nível de eutrofização dos reservatórios.

Os resultados obtidos pelo modelo serão disponibilizados no formato de gráficos e tabelas para cada uma das variáveis como função do espaço e do tempo, dependendo da relevância e necessidade.

Serão feitas modelagens para pelo menos dois cenários hidrodinâmicos diferentes (por exemplo 2 regimes de vazão crítica ou 1 regime de vazão crítica e um regime de vazão média).

Serão feitas modelagens tanto para o cenário atual quanto para o cenário futuro de vazões transpostas/modificadas.

2.5.1. Teoria da Cinética da Qualidade da Água

O Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização a ser desenvolvido neste projeto, tem a cinética muito similar à maioria dos modelos existentes na literatura, por exemplo, veja a Referência Técnica do SisBaHiA® em www.sisbahia.coppe.ufrj.br.

Escalares não-conservativos, que representam a maioria das substâncias existentes na água, sofrem modificação de concentração através de processos físicos, biológicos e químicos. Os processos biológicos e químicos, chamados de reações cinéticas, são definidos para cada substância, sendo, portanto o diferencial deste modelo. O entendimento e a formulação destes processos são fundamentais para a construção do modelo de qualidade de água.

Neste modelo, o campo de velocidades é conhecido, ou seja, o escalar transportado não altera a hidrodinâmica do corpo de água receptor. Como consequência, a modelagem do padrão hidrodinâmico do corpo d'água e a modelagem do transporte do escalar são problemas desacoplados. Assim, para que ocorra uma boa simulação do transporte do escalar, uma adequada simulação do campo hidrodinâmico torna-se necessária.

Em relação aos mecanismos de transporte de uma dada substância em um corpo d'água, o processo advectivo é dominante, sugerindo assim uma enorme dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte. No entanto, os processos difusivos também são muito importantes para a definição do transporte.

A Figura 1 abaixo representa os processos relacionados à dinâmica do fitoplâncton. A Figura 2 representa os processos relacionados ao ciclo do nitrogênio. A Figura 3 representa os processos relacionados ao ciclo do fósforo. A Figura 4 representa os processos relacionados à dinâmica do OD e da DBO.

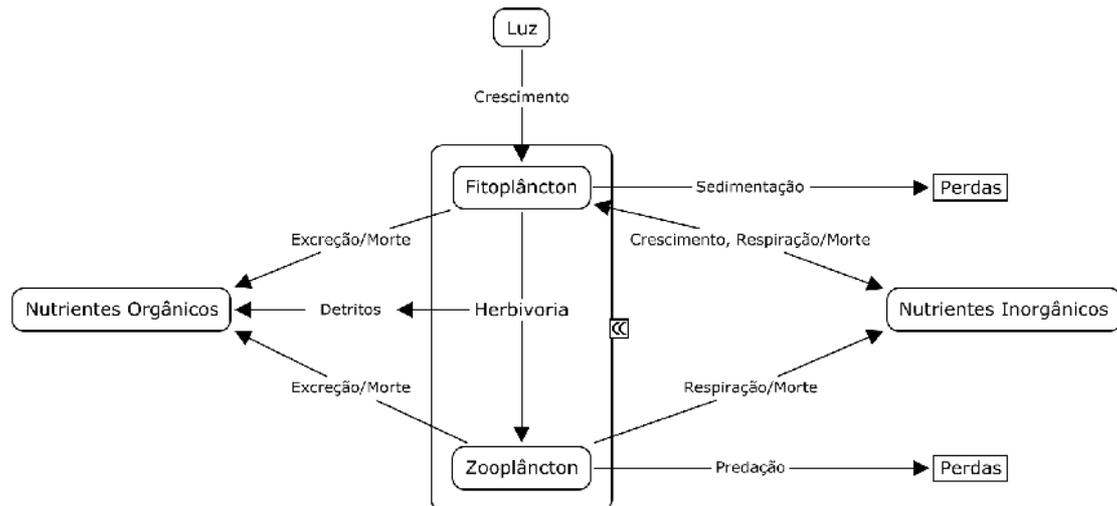


Figura 1: Processos simulados na dinâmica do fitoplâncton

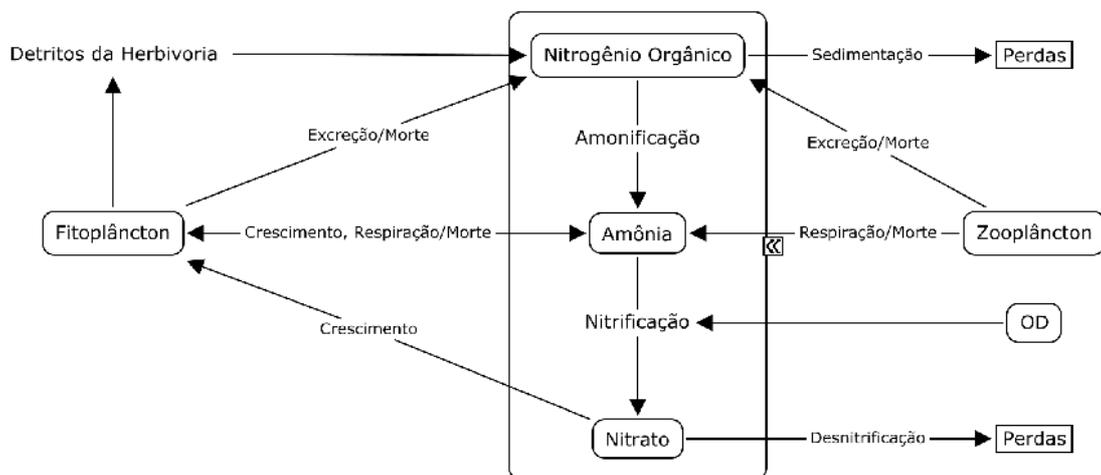


Figura 2: Processos simulados no ciclo do nitrogênio

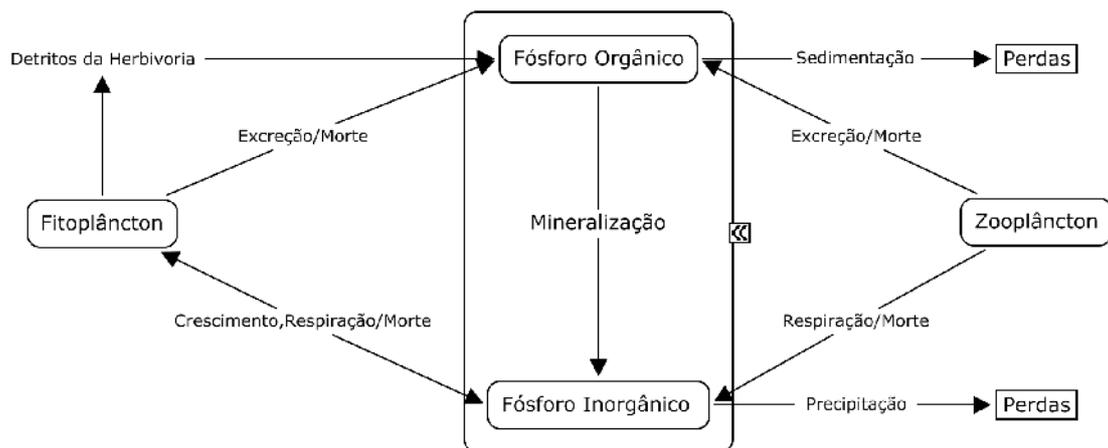


Figura 3: Processos simulados no ciclo do fósforo

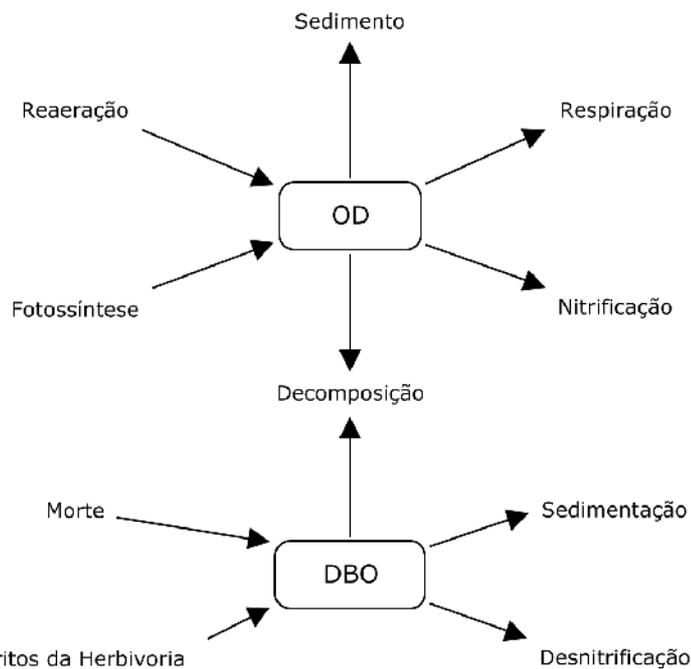


Figura 4: Processos simulados na dinâmica OD-DBO.

Nas figuras anteriores, os esquemas indicam as interações entre as substâncias envolvidas na modelagem e os processos cinéticos. Pode-se observar que as substâncias são interligadas, criando assim um sistema que precisa ser resolvido de forma acoplada.

Em sua maior parte, estes processos são modelados usando reações com coeficientes calculados de forma experimental em laboratórios ou através de experimentos de campo, adquirindo valores dentro de uma faixa específica. Com isso, são grandes as incertezas sobre estes processos de transformações. A calibração do modelo de qualidade de água passa obrigatoriamente pela correta definição destes coeficientes.

O padrão hidrodinâmico usado pelo modelo de qualidade de água é obtido através do modelo hidrodinâmico. Não é possível simular padrões de qualidade de água para um determinado domínio se não for definido, para o cenário estudado, o padrão hidrodinâmico.

A seguir, apresenta-se primeiramente a equação com os termos do transporte advectivo e difusivo, a qual é igual para todas as substâncias, e depois as reações cinéticas para cada escalar.

A equação para qualquer seção do corpo de água (rio) é dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \Sigma R_c \quad (1)$$

Onde C é a concentração do escalar de interesse, U_i são as componentes da velocidade na direção x , D representa o coeficiente de difusão turbulenta de massa, q_p , q_e e q_i são valores dados de vazões por unidade de área de afluentes, e.g. [$m^3/s/m^2$], respectivamente, de precipitação, evaporação e infiltração, ΣR_c representa reações cinéticas de produção ou consumo, mais as fontes e/ou sumidouros (afluêntes e cargas difusas). As reações cinéticas de produção e consumo R_c pertinentes aos diversos parâmetros de qualidade de água são detalhados a seguir, sendo descritos os termos de cada equação, assim como os parâmetros utilizados.

2.5.2. Clorofila a (fitoplâncton) (a)

$$\Sigma R_a = \underbrace{k_g a}_{\text{crescimento}} - \underbrace{k_{ra} a}_{\text{respiração e excreção}} - \underbrace{k_{ea} a}_{\text{mortalidade}} - \underbrace{k_{gz} a}_{\text{herbivoria}} - \underbrace{\frac{v_s}{H} a}_{\text{sedimentação}} \quad (2)$$

No modelo, o fitoplâncton é simulado como um único grupo, utilizando a clorofila a como indicador da sua concentração.

O crescimento de algas é uma função da intensidade de luz, disponibilidade de nutrientes e da temperatura. Utilizando a abordagem da multiplicação dos fatores limitantes, a taxa de crescimento é representada por:

$$k_g = k_g(T) \phi(l) \phi(n) \quad (3)$$

Onde $k_g(T)$ representa a influência da temperatura na taxa de crescimento, $\phi(l)$ representa o fator limitante relacionado à intensidade de luz e $\phi(n)$ representa o fator limitante relacionado à concentração de nutrientes. Os fatores limitantes possuem valores entre 0,0 e 1,0, sendo 0,0 para limitação total e 1,0 para nenhuma limitação.

Quando apenas um grupo de algas é simulado, a influência da temperatura na taxa de crescimento pode ser representada adequadamente através de uma formulação exponencial. A formulação utilizada neste modelo é baseada na equação de Arrhenius, com uma temperatura de referência de 20°C:

$$k_g(T) = k_{g20} \theta^{(T-20^\circ)} \quad (4)$$

Na expressão, k_{g20} é a taxa máxima de crescimento a 20°C sob condições ótimas de luz e com excesso de nutrientes e θ é o fator de correção da temperatura. É comum o valor de θ igual a 1,066 baseado em um grande número de experimentos com várias espécies de fitoplâncton.

Para determinar a limitação do crescimento por nutrientes foi utilizada a cinética de Michaelis-Menten, sendo que os efeitos de cada nutriente foram combinados através do mínimo fator limitante. Neste modelo, apenas o fósforo e o nitrogênio foram considerados como nutrientes limitantes. Assim, o fator de limitação ao crescimento é representado por:

$$\phi_n = \min \left(\frac{(C_1 + C_2)}{k_{sN} + (C_1 + C_2)}; \frac{C_3}{k_{sP} + C_3} \right) \quad (5)$$

Onde k_{sN} e k_{sP} são constantes de meia saturação para as concentrações de fósforo e nitrogênio inorgânico, respectivamente.

As formulações de limitação do crescimento de algas relacionado à intensidade de luz consistem de dois componentes: um descrevendo a atenuação da luz com a profundidade e outro que define o efeito da intensidade de luz resultante no crescimento das algas. A atenuação da luz através da coluna de água é definida, neste modelo, pela lei de Beer-Lambert:

$$I(z) = I_o e^{-k_e z} \quad (6)$$

Acima, $I(z)$ é a intensidade de luz na profundidade z , I_o é a intensidade de luz na superfície e k_e é o coeficiente de extinção da luz.

A intensidade de luz na superfície é uma função do local, época do ano, hora do dia, condições meteorológicas e sombreamento por características topográficas e pela vegetação da região. A intensidade de luz na superfície, usada em formulações de crescimento de algas, corresponde apenas à faixa visível, que tipicamente está em torno de 50% da radiação solar total na superfície utilizada na simulação da temperatura. O coeficiente de extinção da luz k_e utilizado é

$$k_e = k'_e + 0.0088C_9 + 0.054C_9^{2/3} \quad (7)$$

Onde k'_e é a parte do coeficiente de extinção da luz devido à absorção por partículas suspensas, com exceção das algas. No modelo, um valor constante para k'_e é adotado, sendo 0,3 m⁻¹ um valor típico para reservatórios.

O efeito da intensidade de luz resultante no crescimento das algas é representado através da equação:

$$\phi(I) = \frac{I}{I_s} \exp \left(1 - \frac{I}{I_s} \right) \quad (8)$$

Sendo I_s é a intensidade ótima de luz. Como a intensidade de luz é atenuada com a profundidade, a equação (9) deve ser integrada ao longo da profundidade, com a substituição de I pela equação (7). Quando a radiação solar na superfície é utilizada como uma média diária, o fator $\phi(I)$ é multiplicado pelo fotoperíodo - expresso como a fração do dia com luz solar - para representar as horas ensolaradas do dia. Assim, a formulação para limitação do crescimento pela luz, integrada na profundidade e no tempo, é expressa por:

$$\phi(I) = \frac{2.718 f_p}{k_e H} \left[\exp\left(-\frac{I_o}{I_s} e^{-k_e H}\right) - \exp\left(-\frac{I_o}{I_s}\right) \right] \quad (9)$$

Onde f_p é o fotoperíodo e H é a espessura da camada de água. Quando valores instantâneos são utilizados para a radiação na superfície, o valor do fotoperíodo não é considerado.

O modelo completo utilizado para a taxa de crescimento do fitoplâncton, com as considerações citadas acima, pode ser descrito como:

$$k_g = k_{g20} \theta^{(T-20^\circ)} \frac{2.718 f_p}{k_e H} \left[\exp\left(-\frac{I_o}{I_s} e^{-k_e H}\right) - \exp\left(-\frac{I_o}{I_s}\right) \right] \times \min\left(\frac{(C_1 + C_2)}{k_{sN} + (C_1 + C_2)}; \frac{C_3}{k_{sP} + C_3}\right) \quad (10)$$

A respiração e a excreção de algas foram combinadas como um único termo k_{ra} que inclui todas as perdas por processos metabólicos e de excreção. Estas perdas representam a diferença entre o crescimento bruto e o crescimento líquido. Além de representarem perdas da concentração de algas, a respiração e excreção são componentes importantes da reciclagem de nutrientes. Neste modelo, o termo k_{ra} foi descrito como uma função da temperatura através da equação de Arrhenius, com uma temperatura de referência de 20°C:

$$k_{ra} = k_{ra20} \theta_{ra}^{(T-20^\circ)} \quad (11)$$

Sendo k_{ra20} a taxa de perdas de fitoplâncton por respiração e excreção a 20°C e θ_{ra} o fator de correção da temperatura.

A mortalidade não predatória se refere às “perdas” de algas que não são causadas pela herbivoria ou por outros processos de perda, como sedimentação, respiração e excreção. Na mortalidade não predatória estão incluídos os processos de senescência, parasitismo, e mortalidade induzida pelo estresse devido a deficiências severas nos nutrientes, condições ambientais extremas e substâncias tóxicas. Neste modelo, a taxa de mortalidade não predatória é especificada pelo usuário como um coeficiente constante.

Neste modelo, o zooplâncton herbívoro pode ser simulado para representar de maneira mais realista o processo de herbivoria, com o objetivo de obter uma melhor simulação da dinâmica do fitoplâncton. As equações acopladas do fitoplâncton e zooplâncton fornecem as principais características para simular as interações predador-presa, já que a taxa de herbivoria é defini-

da como função da densidade de zooplâncton que, por sua vez, varia dinamicamente com a concentração de fitoplâncton. A taxa de herbivoria foi representada por:

$$k_{gz} = \left(\frac{a}{k_{sa} + a} \right) k_{gz20} C_4 \theta_{gz}^{(T-20)} \quad (12)$$

Onde k_{gz20} é a taxa de predação na temperatura de 20°C, θ_{gz} é o fator de correção da temperatura e k_{sa} é a constante de meia saturação para herbivoria.

A taxa de sedimentação do fitoplâncton depende da sua densidade, tamanho, forma e estado fisiológico das suas células, da viscosidade e densidade da água, e da turbulência e padrão de circulação hidrodinâmico. Além disso, outros fatores dificultam a representação da sedimentação do fitoplâncton, como a formação de vacúolos de gás e de bainhas gelatinosas, que tornam algumas espécies flutuantes. Devido a estas dificuldades, o valor da velocidade de sedimentação vs utilizado neste modelo é constante, sendo considerado como um parâmetro de calibração.

2.5.3. Zooplâncton Herbívoro (Z):

$$\Sigma R_Z = \underbrace{r_{ca} E_z k_{gz} a Z}_{\text{crescimento}} - \underbrace{k_{rz} Z}_{\text{respiração e excreção}} - \underbrace{k_{ez} Z}_{\text{mortalidade}} - \underbrace{k_{gzc} Z}_{\text{predação}} \quad (13)$$

A dinâmica do zooplâncton é governada pelos mesmos processos gerais que regem a dinâmica do fitoplâncton: crescimento, respiração e excreção, predação e mortalidade não predatória. A maior diferença é que o zooplâncton não está sujeito aos processos de sedimentação, uma vez que estes organismos possuem movimentação própria e migram verticalmente na coluna de água.

Na formulação do crescimento do zooplâncton, a taxa de herbivoria k_{gz} , mostrada anteriormente, foi multiplicada por outros dois coeficientes. O coeficiente r_{ca} representa a razão carbono/clorofila nas células das algas, podendo variar entre 10 e 100 mgC(mgChl⁻¹) (BOWIE et al., 1985). Esta razão é uma constante especificada pelo usuário. O segundo coeficiente acrescentado à formulação do crescimento (E_z) é o fator de eficiência de herbivoria. O valor da eficiência varia entre 0,0 e 1,0. O valor 0,0 indica nenhuma assimilação e 1,0 assimilação total. Assim, o fator de eficiência define o quanto da biomassa de alga se torna biomassa de zooplâncton, e o quanto é liberado como detrito.

A respiração e a excreção de zooplâncton são representadas de maneira similar à do fitoplâncton através da equação de Arrhenius, com uma temperatura de referência de 20°C:

$$k_{rz} = k_{rz20} \theta_{rz}^{(T-20)} \quad (14)$$

Sendo k_{rz20} a taxa de perdas de zooplâncton por respiração e excreção a 20°C e θ_{rz} o fator de correção da temperatura.

A mortalidade do zooplâncton também é definida da mesma maneira que a do fitoplâncton, sendo especificada como um coeficiente constante.

Como neste modelo o zooplâncton herbívoro foi o último nível trófico considerado, a dinâmica entre o zooplâncton e níveis tróficos superiores não pode ser simulada. Portanto, a predação por peixes e zooplâncton carnívoro pode ser representada através de uma taxa de predação k_{gzc} constante, ajustada em função da temperatura:

$$k_{gzc} = k_{gzc20} \theta_{gzc}^{(T-20^\circ)} \quad (15)$$

Na qual k_{gzc20} é a taxa de predação do zooplâncton a 20°C e θ_{gzc} é o fator de correção da temperatura.

Nitrogênio Orgânico (N_o):

$$\begin{aligned} \Sigma R_{N_o} = & - \underbrace{k_{71} N_o}_{\text{amonificação}} - \underbrace{\frac{v_{s3}(1-f_7)}{H} N_o}_{\text{sedimentação}} + \underbrace{r_{na}(1-E_z)k_{gz}aZ}_{\text{detritos da herbivoria}} + \underbrace{\frac{r_{na}k_{ra}f_{on}a}{\text{excr. de fitoplâncton}}}_{\text{excr. de fitoplâncton}} \\ & + \underbrace{\left(\frac{r_{na}}{r_{ca}}\right)k_{rz}f_{on}Z}_{\text{excr. de zooplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}k_{ea}f_{on}a}{\text{morte de fitoplâncton}}}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \underbrace{\left(\frac{r_{na}}{r_{ca}}\right)k_{ez}f_{on}Z}_{\text{morte de zooplâncton}} \end{aligned} \quad (16)$$

Amônia ou Nitrogênio Amoniacal (N_A):

$$\begin{aligned} \Sigma R_{N_A} = & \underbrace{\frac{r_{na}k_{ra}(1-f_{on})a}{\text{resp. de fitoplâncton}}}_{\text{resp. de fitoplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}}{r_{ca}}k_{rz}(1-f_{on})Z}_{\text{resp. de zooplâncton}} + \underbrace{\frac{r_{na}k_{ea}(1-f_{on})a}{\text{morte de fitoplâncton}}}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \\ & \underbrace{\left(\frac{r_{na}}{r_{ca}}\right)k_{ez}(1-f_{on})Z}_{\text{morte de zooplâncton}} - \underbrace{\frac{N_A}{(k_{am} + N_A)}r_{na}f_{uN}k_ga}_{\text{crescimento de fitoplâncton}} + \underbrace{k_{71}N_o}_{\text{amonificação}} - \underbrace{k_{12}N_A}_{\text{nitrificação}} \end{aligned} \quad (17)$$

Nitrato (N):

$$\Sigma R_N = \underbrace{k_{12}N_A}_{\text{nitrificação}} - \underbrace{k_{2D}N}_{\text{desnitrificação}} - \underbrace{\left(1 - \frac{N_A}{(k_{am} + N_A)}\right)r_{na}f_{uN}k_ga}_{\text{crescimento de fitoplâncton}} \quad (18)$$

Neste modelo, o nitrogênio orgânico particulado e o dissolvido foram combinados em um único compartimento indisponível para o crescimento de algas (nitrogênio orgânico total). Outra consideração é que, no processo de nitrificação, a oxidação da amônia para nitrato ocorre diretamente, considerando que a transformação de nitrito para nitrato é mais rápida que a transformação de amônia para nitrito. Assim, a concentração de nitrito não é considerada.

Amonificação é a formação de amônia durante o processo de decomposição, tanto anaeróbia como aeróbia, da parte nitrogenada da matéria orgânica dissolvida ou particulada. A taxa de amonificação varia no modelo de acordo com a temperatura, sendo representada através da equação de Arrhenius com uma temperatura de referência de 20°C:

$$k_{71} = k_{71(20)} \theta_{71}^{(T-20^\circ)} \quad (19)$$

Onde $k_{71(20)}$ é a taxa de amonificação a 20°C e θ_{71} é o fator de correção da temperatura.

A parte particulada do nitrogênio orgânico, dada pelo resultado da subtração $(1-f_7)$, sedimenta através da velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas (v_{s3}) dividida pela profundidade. Os valores de f_7 e v_{s3} são constantes, sendo especificados pelo usuário.

A biomassa do fitoplâncton que não é consumida pelo zooplâncton se torna detrito, liberando nitrogênio orgânico particulado. A quantidade de nitrogênio liberado depende da razão nitrogênio/clorofila no fitoplâncton (r_{na}). Neste modelo, a razão nitrogênio/clorofila (r_{na}) foi considerada como sendo variável, sendo representada pela seguinte equação:

$$r_{na} = r_{na\min} + (r_{na\max} - r_{na\min}) \left(\frac{(N_A + N)}{k_{sN} + (N_A + N)} \right) \quad (20)$$

onde $r_{na\min}$ e $r_{na\max}$ são as razões nitrogênio/clorofila mínima e máxima no fitoplâncton, respectivamente, e k_{sN} é a constante de meia saturação para a concentração de nitrogênio inorgânico. Assim, quando não há limitação do crescimento de fitoplâncton por nitrogênio, a razão nitrogênio/clorofila assume o valor máximo, e quando a limitação é completa a razão nitrogênio/clorofila assume o valor mínimo.

A liberação de nutrientes pelo fitoplâncton e pelo zooplâncton através da respiração e excreção é um dos principais componentes da reciclagem de nutrientes, sendo representada como o produto da taxa de respiração e excreção pela estequiometria relacionada ao nutriente no organismo. A porcentagem de nutrientes no zooplâncton foi assumida como sendo igual à do fitoplâncton.

Apesar da respiração e excreção serem simuladas como um único processo na dinâmica do fitoplâncton e do zooplâncton, na dinâmica de nutrientes estes processos são divididos. Assim, a parte de nutrientes liberados pela respiração é transformada em nutrientes inorgânicos, enquanto que a parte liberada pela excreção é transformada em nutrientes orgânicos. No caso do ciclo do nitrogênio, esta divisão é realizada através da utilização do parâmetro f_{on} , especificado pelo usuário, sendo que amônia é liberada pela respiração e nitrogênio orgânico é liberado pela excreção.

A liberação de nutrientes na coluna de água através da morte não predatória de fitoplâncton e de zooplâncton foi representada da mesma forma que a respiração e excreção, sendo que uma

parte do nitrogênio nas células é transformada em amônia e a outra parte em nitrogênio orgânico.

O crescimento de algas é resultado da utilização e conversão de nutrientes inorgânicos em material orgânico através do mecanismo da fotossíntese. O nitrato e a amônia são as formas assimiláveis de nitrogênio consideradas no modelo. Para simular a preferência das algas por amônia, foi utilizada a cinética de Michelis-Menten, com uma constante de meia saturação k_{am} especificada pelo usuário.

Neste trabalho foi considerado que a taxa de consumo de nutrientes para o crescimento de algas aumenta com a concentração externa, mas ao mesmo tempo diminui com a concentração interna de nutrientes nas algas se aproximando do seu valor de saturação. Este efeito foi representado pela seguinte formulação:

$$f_{uN} = \left(\frac{r_{na\max} - r_{na}}{r_{na\max} - r_{na\min}} \right) \left(\frac{(N_A + N)}{k_{uN} + (N_A + N)} \right) \quad (21)$$

onde k_{uN} é a constante de meia saturação para o consumo de nitrogênio, $r_{na\min}$ e $r_{na\max}$ são as razões nitrogênio/clorofila mínima e máxima no fitoplâncton, respectivamente. Assim, o consumo de nitrogênio se aproxima de zero quando a concentração externa de nitrogênio está esgotada ou quando a concentração interna atinge o valor de saturação máximo.

A oxidação de amônia para nitrato é denominada de nitrificação, ocorrendo predominantemente em ambiente aeróbio. Para considerar os efeitos da temperatura e da concentração de oxigênio na taxa de nitrificação, foram utilizadas as formulações de Arrhenius e de Michaelis-Menten:

$$k_{12} = k_{12(20)} \theta_{12}^{(T-20^\circ)} \left(\frac{C_6}{k_{nit} + C_6} \right) \quad (22)$$

Sendo $k_{12(20)}$ a taxa de nitrificação a 20°C, θ_{12} o fator de correção da temperatura e k_{nit} a constante de meia saturação.

A desnitrificação é a redução do nitrato a nitrogênio molecular, sendo realizada por bactérias anaeróbias facultativas, predominantemente em meio anaeróbio. Esta reação resulta na perda de nitrogênio para a atmosfera, uma vez que o nitrogênio molecular está na forma gasosa. A formulação de Arrhenius foi utilizada para considerar os efeitos da temperatura na taxa de desnitrificação:

$$k_{2D} = k_{2D20} \theta_{2D}^{(T-20^\circ)} \quad (23)$$

Onde k_{2D20} é a taxa de nitrificação a 20°C e θ_{2D} é o fator de correção da temperatura.

Fósforo Orgânico (P_o)

$$\begin{aligned}
 \Sigma R_{P_O} = & \underbrace{r_{pa} k_{ra} f_{op} a}_{\text{excr. de algas}} + \underbrace{\left(r_{pa} / r_{ca} \right) k_{rz} f_{op} Z}_{\text{excr. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{pa} k_{ea} f_{op} a}_{\text{morte de algas}} + \underbrace{\left(r_{pa} / r_{ca} \right) k_{ez} f_{op} Z}_{\text{morte de zooplâncton}} \\
 & + \underbrace{r_{pa} (1 - E_z) k_{gz} a Z}_{\text{detritos da herbivoria}} - \underbrace{k_{83} P_O}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{v_{s3} (1 - f_{D8})}{H} P_O}_{\text{sedimentação}}
 \end{aligned} \quad (24)$$

Fósforo Inorgânico (P)

$$\begin{aligned}
 \Sigma R_P = & \underbrace{r_{pa} k_{ra} (1 - f_{op}) a}_{\text{resp. de fitoplâncton}} + \underbrace{\left(r_{pa} / r_{ca} \right) k_{rz} (1 - f_{op}) Z}_{\text{resp. de zooplâncton}} + \underbrace{r_{pa} k_{ea} (1 - f_{op}) a}_{\text{morte de fitoplâncton}} \\
 & + \underbrace{\left(r_{pa} / r_{ca} \right) k_{ez} (1 - f_{op}) Z}_{\text{morte de zooplâncton}} - \underbrace{r_{pa} f_{up} k_g a}_{\text{crescim. de fitoplâncton}} + \underbrace{k_{83} P_O}_{\text{mineralização}} - \underbrace{\frac{v_{fr}}{H} P}_{\text{precipitação}}
 \end{aligned} \quad (25)$$

A variável fósforo inorgânico utilizada no modelo de qualidade da água e eutrofização do Sis-BaHIA[®] se refere ao fosfato inorgânico dissolvido ou fosfato reativo, que está disponível para o crescimento de algas, enquanto a variável fósforo orgânico é composta por fosfato particulado e fosfato orgânico dissolvido, representando um compartimento que não está disponível para o crescimento de algas.

A biomassa do fitoplâncton que não é consumida pelo zooplâncton se torna detrito, liberando fósforo inorgânico. A quantidade de fósforo liberado depende da razão fósforo/clorofila no fitoplâncton (r_{pa}). Neste modelo, a razão fósforo/clorofila é variável, sendo representada pela seguinte equação:

$$r_{pa} = r_{pamin} + \left(r_{pamax} - r_{pamin} \right) \left(\frac{C_3}{k_{sp} + C_3} \right) \quad (26)$$

onde r_{pamin} e r_{pamax} são as razões fósforo/clorofila mínima e máxima no fitoplâncton, respectivamente, e k_{sp} é a constante de meia saturação para a concentração de fósforo inorgânico. Assim, quando não há limitação do crescimento de fitoplâncton por fósforo, a razão fósforo/clorofila assume o valor máximo, e quando a limitação é completa, a razão fósforo/clorofila assume o valor mínimo.

Assim como no ciclo do nitrogênio, a liberação de fósforo por respiração e excreção de fitoplâncton e de zooplâncton foi representada como o produto da sua taxa pela estequiometria relacionada ao fósforo no organismo. No ciclo do fósforo, a parte de nutrientes liberados pela respiração é transformada em fósforo inorgânico, enquanto que a parte liberada pela excreção é transformada em fósforo orgânico. Esta divisão é realizada através da utilização do parâmetro f_{op} , especificado pelo usuário.

A liberação de fósforo na coluna de água através da morte não predatória de fitoplâncton e de zooplâncton foi representada da mesma forma que a respiração e excreção, sendo que uma

parte do fósforo no interior das células é liberada sob a forma de fósforo inorgânico e a outra parte sob a forma de fósforo orgânico.

O fósforo inorgânico é a única forma de fósforo assimilável pelo fitoplâncton considerada no modelo. Como citado anteriormente para o ciclo do nitrogênio, neste modelo a taxa de consumo de nutrientes para o crescimento de algas aumenta com a concentração externa, mas ao mesmo tempo diminui com a concentração interna de nutrientes nas algas se aproximando do seu valor de saturação. Este efeito foi representado no consumo de fósforo inorgânico através da seguinte formulação:

$$f_{uP} = \left(\frac{r_{pamax} - r_{pa}}{r_{pamax} - r_{pamin}} \right) \left(\frac{C_3}{k_{uP} + C_3} \right) \quad (27)$$

onde k_{uP} é a constante de meia saturação para o consumo de fósforo inorgânico, r_{pamin} e r_{pamax} são as razões fósforo/clorofila mínima e máxima no fitoplâncton, respectivamente. Assim, o consumo de fósforo se aproxima de zero quando a concentração externa de fósforo está esgotada ou quando a concentração interna atinge o valor de saturação máximo.

O fósforo orgânico é decomposto em fósforo inorgânico através da ação de microrganismos. Este processo foi representado considerando os efeitos da temperatura, através da equação de Arrhenius:

$$k_{83} = k_{83(20)} \theta_{83}^{(T-20^\circ)} \quad (28)$$

Sendo $k_{83(20)}$ a taxa de mineralização a 20°C e θ_{83} o fator de correção da temperatura.

A parte particulada do fósforo orgânico, dada pelo resultado da subtração $(1-f_{D8})$, sedimenta através da velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas (v_{s3}) dividida pela espessura da camada de água. Os valores de f_{D8} e v_{s3} são constantes, sendo especificados pelo usuário.

Vários fatores físicos, químicos e físico-químicos interferem na precipitação (imobilização) dos íons fosfato, reduzindo sua concentração na água. Para representar este processo, um termo similar ao da sedimentação foi acrescentado à equação do fósforo inorgânico, representando uma perda para o sedimento.

OD: Oxigênio Dissolvido

$$\begin{aligned} \Sigma R_6 = & \underbrace{k_a(O_5 - C_6)}_{\text{reaeração}} - \underbrace{k_D C_5}_{\text{decomp.}} - \underbrace{r_{on} k_{12} C_1}_{\text{nitrificação}} + \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_g a}_{\text{fotossíntese}} - \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ra} a}_{\text{respiração de fitoplâncton}} \\ & - \underbrace{r_{oc} k_{r2} Z}_{\text{respiração de zooplâncton}} - \underbrace{\frac{SOD}{H}}_{\text{sedimento}} \end{aligned} \quad (29)$$

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio

$$\Sigma R_5 = - \underbrace{k_D C_5}_{\text{decomp.}} - \underbrace{\frac{v_{s3}(1-f_{D5})}{H} C_5}_{\text{sedimentação}} + \underbrace{r_{oc} r_{ca} (1-E_z) k_{gz} a}_{\text{detritos da herbivoria}} + \underbrace{r_{oc} r_{ca} k_{ea} a}_{\text{morte de fitoplâncton}} + \underbrace{r_{oc} k_{ez} Z}_{\text{morte de zooplâncton}} \quad (30)$$

A demanda biológica de oxigênio (DBO) pode ser dividida em duas partes:

DBO carbonácea: demanda de oxigênio dissolvido para decompor a matéria orgânica.

DBO nitrogenada: demanda de oxigênio dissolvido devido à nitrificação.

Neste modelo, a DBO é representada apenas pela parte carbonácea, sendo que os efeitos da nitrificação são representados diretamente na equação do oxigênio dissolvido.

Diversos fatores influem na taxa de decomposição da matéria orgânica. Neste modelo, é considerada a influência da temperatura e da concentração de oxigênio dissolvido. Este efeito é representado através das equações de Arrhenius e de Michaelis-Menten:

$$k_d = k_{d20} \theta_d^{(T-20^\circ)} \left(\frac{C_6}{k_{DBO} + C_6} \right) \quad (31)$$

Na expressão acima, k_{d20} é a taxa de decomposição a 20°C, θ_d é o fator de correção da temperatura e k_{DBO} é a constante de meia saturação para o consumo de oxigênio.

A taxa de dissolução do oxigênio na água é proporcional à diferença entre a concentração de saturação e a atual concentração de oxigênio dissolvido. Existem diversas formulações para a taxa de reaeração em rios, estuários e lagos. A formulação de Wanninkhof para lagos é descrita por:

$$k_a = \frac{k_l}{H} \quad ; \quad k_l = 0.0986 W_{10}^{1.64} \quad (32)$$

Sendo k_l o coeficiente de transferência de oxigênio na superfície e W_{10} a velocidade do vento medida 10 m acima da superfície. O usuário também pode escolher um valor constante para a taxa de reaeração. Neste caso, k_a será ajustado pela temperatura:

$$k_a = k_{a20} \theta_a^{T-20^\circ} \quad (33)$$

onde $k_{a(20)}$ é taxa de reaeração na temperatura de 20°C e θ_a é o fator de correção da temperatura para a reaeração.

A concentração de saturação de oxigênio no modelo depende da temperatura, salinidade e pressão parcial devida à altitude. As formulações utilizadas para representar a concentração de saturação são:

Concentração de saturação do oxigênio dissolvido em (mg/L):

$$\begin{aligned}
 OD_{\text{sat}} = \exp \left\{ -139.34411 + \frac{(157570.1)}{T_a} - \frac{(66423080)}{T_a^2} + \right. \\
 \left. \frac{(1.2438 \times 10^{10})}{T_a^3} - \frac{(8.621949 \times 10^{11})}{T_a^4} - \right. \\
 \left. -S \left(0.017674 - \frac{10.7454}{T_a} + \frac{2140.7}{T_a^2} \right) \right\} - 0.1148Z_{\text{mar}}
 \end{aligned} \quad (34)$$

Onde T_a é a temperatura absoluta da água em graus Kelvin, S é a salinidade e Z_{mar} é a cota acima do nível do mar em km.

O oxigênio consumido nas duas etapas da nitrificação pode ser calculado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 r_{oa} &= 3.428571 \text{ g(OD)/g(NH}_3 \Rightarrow \text{NO}_2) \\
 r_{oi} &= 1.142857 \text{ g(OD)/g(NO}_2 \Rightarrow \text{NO}_3)
 \end{aligned} \quad (35)$$

Onde r_{oa} e r_{oi} representam a quantidade de oxigênio dissolvido consumida para a oxidação de amônia a nitrito e para a oxidação de nitrito a nitrato, respectivamente. O consumo de oxigênio durante todo o processo pode ser representado como:

$$r_{on} = r_{oa} + r_{oi} = 4.571428 \text{ g(OD)/g(NH}_3 \Rightarrow \text{NO}_3) \quad (36)$$

Sendo então r_{on} a quantidade de oxigênio dissolvido consumida por unidade de massa de nitrogênio oxidado no processo total de nitrificação ou de oxidação de amônia para nitrato.

A quantidade de oxigênio produzida por quantidade de carbono orgânico criado através da fotossíntese é dada por:

$$r_{oc} = 2,6667 \text{ g(OD)/g(C)} \quad (37)$$

Como o fitoplâncton está representado no modelo através de clorofila a e não de carbono, este valor é multiplicado pela razão carbono/clorofila a nas células das algas. A produção de oxigênio através da fotossíntese varia de acordo com a taxa de crescimento e a concentração de fitoplâncton.

Na respiração, que é o processo oposto ao da fotossíntese, o oxigênio é consumido e o dióxido de carbono é liberado. A razão r_{oc} agora significa a quantidade de oxigênio consumido na decomposição de um grama de carbono orgânico. Neste modelo, é considerada a respiração

de fitoplâncton e zooplâncton, que depende da taxa de respiração e da concentração de cada organismo.

A parte do fitoplâncton que não foi consumida pelo zooplâncton durante o processo de herbivoria é transformada em DBO. Os detritos são transformados em DBO através da multiplicação das razões r_{oc} e r_{ca} pela concentração de fitoplâncton dada em clorofila.

As perdas de fitoplâncton e zooplâncton através da mortalidade não predatória são transformadas em DBO seguindo a mesma abordagem utilizada para os detritos da herbivoria.

Assim como os nutrientes orgânicos, a parte particulada da matéria orgânica ($1-f_{D5}$), sedimenta com a velocidade de sedimentação de substâncias orgânicas (v_{s3}) dividida pela profundidade. Os valores de f_{D5} e v_{s3} são constantes, sendo especificados pelo usuário.

A decomposição da matéria orgânica presente nos sedimentos pode representar uma parte significativa do consumo de oxigênio no corpo de água. A demanda de oxigênio no sedimento representada no modelo depende da temperatura, sendo expressa por:

$$SOD = SOD_{20} \theta_s^{(T-20^\circ)} \quad (38)$$

Sendo SOD_{20} a demanda de oxigênio no sedimento na temperatura de 20°C e θ_s o fator de correção da temperatura.

A Tabela 1 a seguir lista os parâmetros, taxas e coeficientes adotados nas reações cinéticas e apresenta os valores usuais

Sím	Parâmetro	Faixa de Valores	Valores usuais	Unidades
E_z	Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas	0.4 a 0.8	0.6	...
f_{D5}	Fração de DBO dissolvido na coluna de água	0.1 a 0.9	0.5	...
f_{D7}	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna de água	0.1 a 1.0	1.0	...
f_{D8}	Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna de água.	0.1 a 1.0	0.85	-
f_{on}	Fração de morte e respiração do fitoplâncton reciclada para nitrogênio orgânico	...	0.5	...
f_{op}	Fração de morte e respiração da fitoplâncton reciclada para fósforo orgânico	0.1 a 0.9	0.5	-
I_s	Nível ótimo de luz	200 a 350	250 a 300	ly d ⁻¹
$k_{12(20)}$	Coeficiente de nitrificação em 20°C	0.03 a 0.9	0.1 a 0.5	d ⁻¹
$k_{71(20)}$	Coeficiente de amonificação em 20°C	0.001 a 0.2	0.03	d ⁻¹
$k_{83(20)}$	Coeficiente de mineralização do fósforo orgânico em 20°C	0.001 a 0.8	0.03	d ⁻¹
k_{a20}	Coeficiente de reaeração em 20°C	0.1 a 5.0	1.38	d ⁻¹
k_{am}	Constante de meia saturação para preferência de	...	50	µgN/l

PLANO DE TRABALHO – TRANSPOSIÇÃO DE VAZÕES DO PARAÍBA DO SUL

Sím	Parâmetro	Faixa de Valores	Valores usuais	Unidades
	amônia			
K_{2D20}	Coeficiente de desnitrificação em 20°C	0 a 1.0	0.1	d ⁻¹
k_{D20}	Coeficiente de desoxigenação em 20°C	0.01 a 1.5	0.2	d ⁻¹
k_{DBO}	Constante de meia saturação para oxidação da DBO		0.5	mgO ₂ /ℓ
k_{ea}	Taxa de mortalidade do fitoplâncton	0.003 a 0.17	0.01 a 0.1	d ⁻¹
k_{ez}	Taxa de mortalidade do zooplâncton	0.001 a 0.125	0.005 a 0.02	d ⁻¹
k_{g20}	Taxa de crescimento do fitoplâncton a 20°C	0.2 a 8.0	2.0	d ⁻¹
k_{gz20}	Taxa de predação do fitoplâncton pelo zooplâncton a 20°C	0.5 a 5.0	1.0 a 2.0	m ³ gC ⁻¹ d ⁻¹
k_{gz20}	Perdas do zooplâncton por predação	0.001 a 0.1	0.01 a 0.05	d ⁻¹
k_{NIT}	Constante de meia saturação da nitrificação por limitação de oxigênio	0.5 a 2.0	0.5	mgO ₂ /ℓ
k_{NO3}	Constante de meia saturação da desnitrificação por limitação de oxigênio		0.1	mgO ₂ /ℓ
k_{ra20}	Perdas de fitoplâncton por respiração e excreção a 20°C	0.005 a 0.8	0.05 a 0.2	d ⁻¹
k_{rz20}	Perdas do zooplâncton por respiração e excreção a 20°C	0.001 –0.36	0.01 a 0.05	d ⁻¹
k_{sa}	Constante de meia saturação para predação de zooplâncton sobre alga	2 a 25	5 a 15	(µgChla/ℓ)
k_{sN}	Constante de meia saturação de N	1.4 a 400	25 a 200	µgN/ℓ
k_{sP}	Constante de meia saturação de P	0.5 a 80.0	20 a 50	µgP/ℓ
k_{uN}	Constante de meia saturação de para o consumo de N	0.0014 a 0.2000		mgN/ℓ
k_{uP}	Constante de meia saturação para o consumo de P	0.0028 a 0.0700		mgP/ℓ
r_{ca}	Razão carbono/clorofila nas células das algas	10 a 100	50	g(C)/g(Chla)
r_{namax}	Razão nitrogênio/clorofila máxima nas células das algas	8.0 a 15.0		mg(N)/mg(Chla)
r_{namin}	Razão nitrogênio/clorofila mínima nas células das algas	1.5 a 4.0		mg(N)/mg(Chla)
r_{pamax}	Razão fósforo/clorofila máxima nas células das algas	1.0 a 10.9		mg(P)/mg(Chla)
r_{pamin}	Razão fósforo/clorofila mínima nas células das algas	0.1 a 1.0		mg(P)/mg(Chla)
SOD_2	Demanda de oxigênio no sedimento em 20°C	0.2 a 4.0	1.0	gO ₂ m ⁻² d ⁻¹
V_{fr}	Velocidade de precipitação do fósforo inorgânico	m d ⁻¹

Sím	Parâmetro	Faixa de Valores	Valores usuais	Unidades
V_{s_3}	Velocidade de deposição de substância orgânica	0.2 a 2.3	1.0	m d ⁻¹
V_{s_4}	Velocidade de sedimentação da biomassa	0 a 30.0	0.05 a 2.0	m d ⁻¹
θ_{12}	Coeficiente de temperatura para a nitrificação	1.02 a 1.08	1.08	...
θ_{2D}	Coeficiente de temperatura para desnitrificação	1.02 a 1.09	1.045	...
θ_{71}	Coeficiente de temperatura para a amonificação	1.02 a 1.09	1.08	...
θ_{83}	Coeficiente de temperatura para a mineralização do fósforo orgânico	1.02 a 1.09	1.08	...
θ_a	Coeficiente de temperatura para a reaeração	1.008 a 1.047	1.024	...
θ_D	Coeficiente de temperatura para a desoxigenação	1.02 a 1.15	1.047	...
θ_g	Fator de correção da temperatura para o crescimento de fitoplâncton	1.01 a 1.2	1.066	...
θ_{gz}	Fator de correção da temperatura para predação de fitoplâncton por zooplâncton	...	1.08	...
θ_{gzc}	Fator de correção da temperatura para perdas do zooplâncton por predação	...	1.08	...
θ_{ra}	Fator de correção da temperatura para perdas de fitoplâncton por respiração e excreção	...	1.08	...
θ_{rz}	Fator de correção da temperatura para perdas do zooplâncton por respiração e excreção	...	1.08	...
θ_s	Coeficiente de temperatura para a demanda de oxigênio no sedimento	...	1.08	...

Tabela 1: Taxas e coeficientes adotados nas reações cinéticas e apresenta os valores usuais

2.6. Estudos de modelagem dos reservatórios e captações

O modelo para simulação utiliza a seguinte topologia: os reservatórios com ou sem geração, as usinas geradoras, as usinas a fio d'água e as captações de água (tal como a Calha Cedae no sistema Light) são representados através de nós, enquanto as interligações entre esses nós são representadas por arcos, como por exemplo, os arcos de vertimento e turbinamento das usinas e reservatórios.

O critério de otimização do modelo leva em conta uma representação multi etapas, onde a decisão tomada na etapa t influenciará diretamente nas etapas seguintes resolvendo o problema de uma vez só e da maneira mais próxima à realidade possível, ao invés de resolvê-lo de uma maneira “cega”, onde são resolvidos n problemas em n etapas, sendo o elo de ligação entre eles o volume final dos nós no problema t que é igual ao volume inicial do problema t+1, não enxergando o problema nas etapas seguintes.

A topologia adotada para o modelo no conjunto de dados automaticamente instalado pelo modelo Parsul (subdiretório/dados), como os limites de capacidade dos arcos estão representados na figura a seguir:

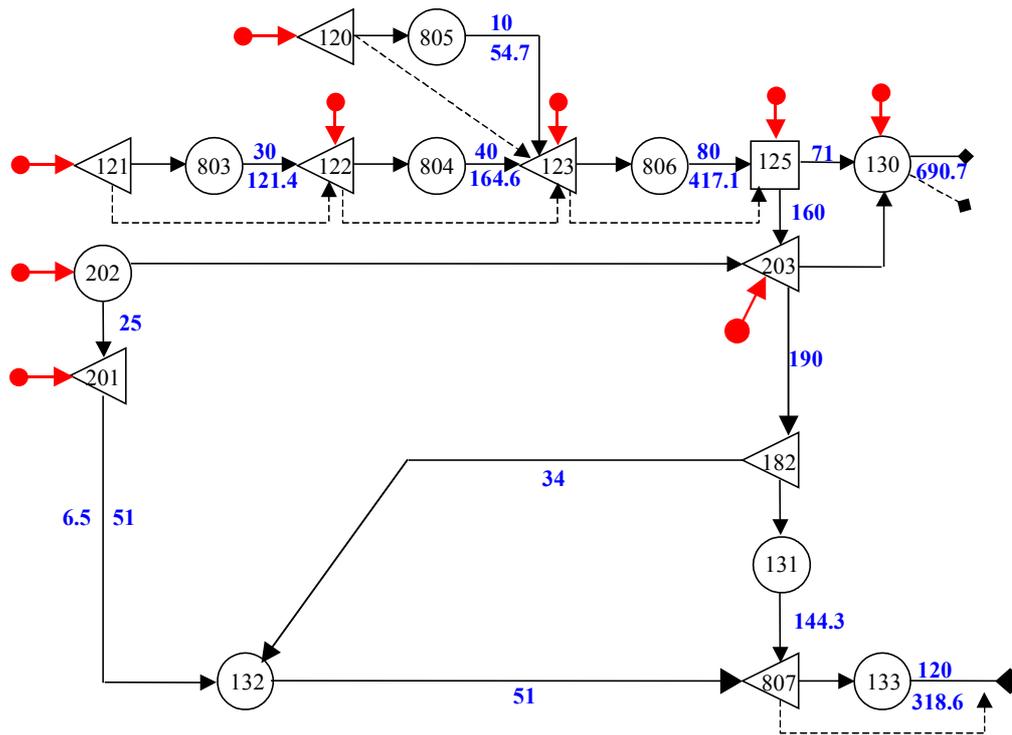


Figura 5: Limites de capacidade dos arcos

Os pontos em vermelho são as vazões incrementais dos nós, e os valores em azul representam as capacidades mínimas e máximas dos arcos adotando a seguinte terminologia: os valores à esquerda e acima dos arcos são os valores mínimos, e os valores à direita e abaixo dos arcos representam os valores máximos.

Os arcos tracejados representam os arcos de vertimento. As equações adotadas no modelo serão dispostas de forma mais detalhada em seguida.

Esse modelo poderá ser facilmente utilizado com outras configurações.

2.6.1. Equação de balanço hídrico nos nós do sistema

Para cada nó do sistema escreve-se uma equação de equilíbrio de massa, que estabelece que a variação do volume estocado (positiva ou negativa) é dada pela diferença entre os volumes afluentes e os volumes defluentes, incluindo evaporação.

2.6.1.1. Balanço hídrico para nós com reservatórios

$$V_{i,t+1} + \sum_{k \in S^-(i)} Q_{k,t} - \sum_{k \in S^+(i)} Q_{k,t} + E(V_{i,t}) = V_{i,t} + I_{i,t} - U_{i,t} \quad i \in R, t \in T \quad (1a)$$

onde:

N conjunto de nós

A	conjunto de arcos
Q	vazão dos arcos à montante (S+) e à jusante (S-)
$R \sqcap N$	conjunto dos nós com reservatório
$S^+(i), S^-(i)$	conjunto de arcos que chegam / partem para/de nó i
V_i^0, V_i^f	volume inicial / final do nó i
Ii	volume afluente incremental ao nó i
Ui	uso consuntivo no nó i
$E(V_i)$	volume evaporado no nó i

O volume evaporado é calculado pela seguinte aproximação (linear):

$$E(V_i) = T_i * (A_i(v) = a_i V_{med_i} + b_i), \text{ onde}$$

V_{med_i} é o volume médio no mês, calculado como a média aritmética dos volumes do início e fim da etapa e T_i corresponde ao coeficiente de evaporação mensal do reservatório [mm/mês].

Os parâmetros a e b são determinados a partir dos polinômios cota x volume e cota x área, que relacionam os volumes mínimos e máximos com as áreas mínimas e máximas de cada reservatório através das seguintes equações:

$$a_i = \frac{(AreaMax_i - AreaMin_i)}{(VolMax_i - VolMin_i)}$$

$$b_i = AreaMin_i - a_i \cdot VolMin_i$$

A aproximação linear é necessária porque o modelo matemático utiliza um pacote comercial de programação linear-inteira, o que inviabiliza o uso de expressões não-lineares. Foram realizados testes onde se comparou esta aproximação com o cálculo baseado no uso dos polinômios, com resultados muito próximos.

2.6.1.2. Balanço hídrico para nós sem reservatórios

No caso do nó não conter um reservatório, os termos relativos ao volume útil inicial/final não existem, e a expressão (1) se reduz a:

$$\sum_{k \in S^-(i)} Q_{k,t} - \sum_{k \in S^+(i)} Q_{k,t} = I_{i,t} - \tilde{E}_{i,t} - U_{i,t} \quad i \in F, t \in T \quad (1b)$$

onde :

$F \subset N$	conjunto dos nós sem reservatório
\tilde{E}_i	volume evaporado no mês t (constante)
Q	vazão dos arcos à montante (S+) e à jusante (S-)

2.6.1.3. Volume útil máximo

Estas restrições são auto-explicativas.

$$V_{i,t} \leq \bar{V}_i \quad i \in R \quad (2)$$

2.6.2. Enchimento / esvaziamento dos reservatórios

As regras de operação para o Rio Paraíba do Sul estabelecerão prioridades para o enchimento / esvaziamentos dos reservatórios de cabeceira (como os existentes nos rios Paraíba, Santa Branca, Jaguari e Funil). Definem-se curvas limites $C(i,m)$, $m=1..M(i)$, como frações do volume útil, sendo que necessariamente $C(i,1) = 0\%$ e $C(i,M(i)) = 100\%$.

Por exemplo:

As faixas operativas são os intervalos $[C(i,m), C(i,m+1)]$, para $m=1.. M(i)-1$. Ao início da etapa, determina-se a faixa operativa corrente $F(i)$ de cada reservatório i como sendo:

$$F(i) = \text{Max}_{k=1,2,\dots,M(i)-1} \{V_{i,t} / \bar{V}_i > C(i,k)\}$$

Observe que os valores $F(i)$ são dados de entrada para o modelo (para a primeira etapa), dado que os volumes úteis iniciais são conhecidos.

A prioridade de enchimento será em ordem crescente de $F(i)$. Ou seja, reservatórios mais vazios serão os primeiros a armazenar água. A prioridade de esvaziamento será em ordem decrescente de $F(i)$. Ou seja, reservatórios mais cheios serão os primeiros a esvaziar.

No caso dos reservatórios estarem na mesma faixa operativa, existe uma tabela (dado de entrada) que estabelece as prioridades de enchimento/esvaziamento de desempate.

A partir destas regras, são criados dois vetores auxiliares v_1, v_2 com prioridades respectivamente de enchimento / esvaziamento. Supondo os seguintes índices $\{1=\text{Paraíba}, 2=\text{Santa Branca}, 3=\text{Jaguari} \text{ e } 4=\text{Funil}\}$, o vetor $v_1 = (1,2,3,4)$, por exemplo, estabelece que a ordem de armazenamento é 1-2-3-4. O vetor $v_2 = (4,3,2,1)$, por exemplo, estabelece que a ordem de esvaziamento é 4-3-2-1

Variáveis de decisão binárias são incluídas na formulação de maneira a permitir a ocorrência de armazenamento / esvaziamento dos reservatórios. Estas variáveis são descritas a seguir.

2.6.2.1. Enchimento

$x_{i,t}^a = 1$, se reservatório i está armazenando água (enchendo)

$x_{i,t}^a = 0$, caso contrário

O enchimento ocorre, quando $V_{i,t+1} - V_{i,t} > 0$. Portanto, podemos escrever:

$$V_{i,t+1} - V_{i,t} \leq Gx_{i,t}^a \quad i \in R, t \in T \quad (3a)$$

onde G é um número grande. Observa-se, como desejado, que o enchimento do reservatório i só será possível se $x_{i,t}^a = 1$.

2.6.2.2. Deplecionamento

$x_{i,t}^e = 1$, se reservatório i está deplecionando (esvaziando)

$x_{i,t}^e = 0$, caso contrário

O esvaziamento ocorre, quando $V_{i,t} - V_{i,t+1} > 0$. Portanto, podemos escrever:

$$V_{i,t} - V_{i,t+1} \leq Gx_{i,t}^e \quad i \in R, t \in T \quad (3b)$$

onde G é um número grande. Observa-se, como desejado, que o esvaziamento do reservatório i só será possível se $x_i^e = 1$.

Finalmente, a prioridade de enchimento e de esvaziamento dos reservatórios pode ser introduzida no modelo através das seguintes desigualdades de precedência:

$$x_{v1(4),t}^a \leq x_{v1(3),t}^a \leq x_{v1(2),t}^a \leq x_{v1(1),t}^a \quad i \in R, t \in T \quad (3c)$$

$$x_{v2(4),t}^e \leq x_{v2(3),t}^e \leq x_{v2(2),t}^e \leq x_{v2(1),t}^e \quad i \in R, t \in T \quad (3d)$$

2.6.2.3. Volumes regularizados mínimos e máximos

Cada arco conecta dois nós do sistema. O fluxo volumétrico de cada arco pode ser limitado inferiormente ou superiormente, por exemplo, para atender restrições de segurança, defluências mínimas para controle de poluição, ou para atender restrições de consumo de água.

Como, fisicamente, não se pode garantir o atendimento destas restrições, são definidas *variáveis de folga* ΔQ_k^+ e ΔQ_k^- , que medem quanto estas restrições estão sendo violadas. As variáveis de folga são penalizadas na função objetivo do problema. O custo unitário das penalizações é definido de maneira a respeitar a prioridade pelo uso da água, quando diferentes restrições são conflitantes, isto é, não podem ser respeitadas *conjuntamente*.

De maneira equivalente as violações para vazão máxima e mínima, existem variáveis de folga ΔAle_k^- e ΔEsp_k^+ medem o quanto as restrições associadas aos volumes de espera e de mínimo operativo estão sendo violadas, e são penalizadas da mesma forma que as anteriores na função objetivo.

2.6.2.4. Fluxo volumétrico máximo

$$Q_{k,t} - \Delta_{k,t}^+ \leq \bar{Q}_k \quad k \in A, t \in T \quad (4a)$$

Para os arcos de produção, o valor do engolimento máximo será automaticamente calculado como a razão entre a potência instalada da usina e seu fator de produção.

2.6.2.5. Fluxo volumétrico mínimo

$$Q_{k,t} + \Delta^-_{k,t} \geq \underline{Q}_{k,t} \quad k \in A, t \in T \quad (4b)$$

Para o caso de Santa Cecília, existem dois valores para fluxos volumétricos mínimos: um associado ao bombeamento e outro à descarga mínima a jusante para o do Rio Paraíba do Sul. Estes valores, ao contrário dos valores dos demais arcos, não são constantes. A razão é que as metas de vazões mínimas em Santa Cecília dependem do volume armazenado do reservatório equivalente.

Desta maneira, o modelo de simulação verifica em cada instante de tempo qual o estado de armazenamento do reservatório equivalente para se checar quais vazões mínimas operativas em Santa Cecília devem ser utilizadas.

Seja $Y_{k,t}$ uma variável binária definida como:

$Y_{k,t} = 1$ armazenamento do reservatório equivalente (faixa de operação k e $k-1$)

$Y_{k,t} = 0$ caso contrário.

Na formulação matemática do modelo, as seguintes desigualdades são escritas para cada instante de tempo t :

$$\sum_{k=1}^{NCL+1} Vcl_{k,t} = VEq_t \quad t \in T \quad (4c.1)$$

$$Y_{k-1,t} \times CL_{(k-1,t)} \leq Vcl_{k-1,t} \leq CL_{k,t} \times Y_{k-1,t} \quad t \in T, k \in 2..NCL+2 \quad (4c.2)$$

$$\sum_{k=1}^{NCL+1} Y_{k,t} = 1 \quad t \in T \quad (4c.3)$$

onde $CL(1) = 0$ e $CL(NCL+2) = 1$

O modelo utilizará as vazões mínimas da seguinte maneira: caso o volume do reservatório equivalente esteja entre as curvas limite k e $k-1$, ele utilizará as vazões estipuladas para a curva limite k . Logo, o número de faixas de operação será sempre uma unidade maior que o número de curvas limite utilizadas, e para cada faixa de operação será necessário estipular as vazões mínimas de bombeamento e de descarga para o Paraíba do Sul. Por exemplo, utilizando três curvas limite, o número de faixas de operação é igual a quatro.

As vazões mínimas nos arcos que saem de Santa Cecília são descritas a seguir:

- Arco de bombeamento

$$Q_{bomb,t} + \Delta^-_{bomb,t} \geq \sum_{k=1}^{NF} Y_{k,t} \cdot \underline{Q}_{bomb,k} \quad t \in T, k \in NF \quad (4d.1)$$

onde $\underline{Q}_{bomb,k}$ é o bombeamento da faixa de operação entre as curvas limite k e $k-1$.

- Arco de descarga mínima a jusante de S.Cecília

$$Q_{desc,t} + \Delta^-_{desc,t} \geq \sum_{k=1}^{NF} Y_{k,t} \cdot \underline{Q}_{desc,k} \quad t \in T, k \in NF \quad (4d.2)$$

onde $\underline{Q}_{desc,k}$ é a descarga da faixa de operação entre as curvas limite k e $k-1$.

2.6.2.6. Volume mínimo operativo

$$V_{k,t} + \Delta Ale^-_{k,t} \geq \underline{VAle}_{k,t} \quad k \in N, t \in T \quad (4e)$$

onde \underline{VAle} é o volume de mínimo operativo (restrições operativas para o volume mínimo do reservatório, em hm³).

2.6.2.7. Volume de espera

$$V_{k,t} - \Delta Esp^+_{k,t} \leq \overline{VEsp}_{k,t} \quad k \in N, t \in T \quad (4f)$$

onde \overline{VEsp} é o volume de espera para amortecimento de cheias do reservatório, em hm³.

2.6.3. Produção e consumo de energia

Para alguns casos, é possível calcular a produção / consumo de energia, multiplicando-se a produtividade ρ (MWh/hm³) pelo fluxo volumétrico de água no arco (hm³).

O fator de produção constante de uma usina representa uma altura de queda constante (queda de referência) para o cálculo da produção energética. Esta aproximação será boa se a variação da cota do reservatório for pequena quando comparada à diferença entre a cota do reservatório e a cota da unidade geradora. Felizmente este é o caso das unidades geradoras da Light. Adicionalmente, o modelo matemático emprega um pacote comercial de programação linear-inteira, o que inviabiliza o uso de expressões não-lineares.

O modelo trata a produção de energia como um benefício na função objetivo, descontando das “Penalidades totais” uma parcela devido à energia produzida. As equações que regem a produção de energia do modelo são as seguintes:

$$\rho_i \cdot Q_{i,t} \leq P_i \quad i \in G, t \in T \quad (5a)$$

onde:

$G \subset N$	conjunto dos nós com geração
P_i	capacidade máxima instalada (MW)
Q_i	vazão dos arcos de turbinamento (m ³ /s)
ρ_i	fator de produção constante da usina (MW/m ³ /s)

Para o caso de usinas de bombeio, o valor ρ_i é negativo, refletindo um consumo de energia. Neste caso, a equação (4) é reescrita como:

$$\rho_i \cdot Q_{i,t} \geq -P_i \quad i \in G, t \in T \quad (5b)$$

Após a otimização, o modelo recalcula a produção de energia para a mesma quantidade de água turbinada, somente refinando o fator de produção utilizado, que será calculado através do polinômio cota x volume e da curva chave do canal de fuga. A expressão final para a energia produzida é:

$$\text{Produção [MW]} = QDec * Kesp * HLiq \quad (5c)$$

Onde:

- QDec é a vazão do arco de produção correspondente (m³/s)
- Kesp é a produtibilidade específica (MW/m³/s/m);
- HLiq é a altura de queda líquida calculada como:

$$HLiq = h_1(V) - h_2(QDec) - hperdas \quad (5d)$$

Onde:

- h1 (V) é a altura calculada através da integração do polinômio cota x volume do reservatório, utilizando como limites da integral os volumes da etapa t + 1 e t.
- h2 (QDec) é a altura calculada através da curva chave do canal de fuga
- hperdas é a altura equivalente das perdas hidráulicas (metro ou % da altura de queda)

2.6.4. Vertimento de superfície e de fundo

Os reservatórios possuem dois tipos de vertimento:

- Vertimento de superfície

A usina pode verter desde que seu volume seja superior ao volume na soleira do vertedor (dado de entrada em hm³).

Seja $Y(a,t)$ uma variável binária definida como:

$Y(a,t) = 1$ vertimento de superfície liberado

$Y(a,t) = 0$ não pode verter

Na formulação matemática do modelo, escrevem-se as seguintes desigualdades para cada instante de tempo t :

$$VSoleira(n) * Y(a,t) - V(n,t) \leq 0 \quad (6a)$$

$$QVSup(a,t) - Y(a,t) * G \leq 0 \quad (6b)$$

onde G é um número grande e a representa o arco de vertimento. Observa-se, como desejado, que o vertimento de superfície do reservatório n só será possível se $Y(a,t) = 1$.

- Vertimento de fundo

A usina pode verter estando com qualquer volume até um limite estipulado pelo usuário (em m³/s).

Na formulação matemática do modelo, escreve-se a seguinte desigualdade para cada instante de tempo t :

$$QVFun(a,t) + QTurb(k,t) \leq Limite(n) \quad (6c)$$

onde a representa o arco de vertimento, k representa o arco de turbinamento e n o reservatório.

2.6.5. Manutenção

É possível definir os dados de manutenção para as usinas, assim como a taxa equivalente de indisponibilidade força (TEIF) e programada (TEIP).

A TEIF será sempre considerada, já a TEIP só será considerada caso não exista registros de manutenção para a usina em questão.

Quando houver cronograma de manutenção da usina, sua capacidade instalada será diminuída do seguinte fator:

$$(1 - TEIF(n)/100) * (1 - (Manut(n,m)/100)) * Pot(n) \quad (7)$$

Onde $Manut(n,m)$ é um fator equivalente de manutenção da usina n no mês m , em função dos cronogramas, que são registros contendo datas de início e fim de cada manutenção e MW não disponibilizados pela manutenção.

Caso contrário, a TEIP será considerada:

$$(1 - TEIF(n)/100) * (1 - (TEIP(n)/100)) * Pot(n) \quad (8)$$

onde n representa a usina, e m o mês da manutenção.

2.6.6. Função objetivo

A função objetivo minimiza a soma das penalizações decorrentes das violações dos fluxos volumétricos mínimos e máximos nos arcos da rede, e das penalizações decorrentes das violações dos volumes de mínimo operativo e de espera dos reservatórios.

$$Z = Min \sum_t \left(\sum_k (c_k^+ \Delta_{k,t}^{2+} + c_k^- \Delta_{k,t}^{2-}) + \sum_j (c_j^+ \Delta_{j,t}^{Esp} + c_j^- \Delta_{j,t}^{Ale}) - p_1 \sum_j (V_{j,t}) - p_2 \sum_i (\rho_i Q_{i,t}) \right) \quad (9)$$

Onde

- k = índice de arcos
- t = índice de tempo
- c_k^+ , c_k^- , c_j^+ , c_j^- = penalizações associadas aos arcos (sub-índice k) e nós (sub-índice j)

- j = índice de nós com reservatórios
- i = índice de nós de geração
- p_1 = benefício associado ao armazenamento de água nos reservatórios do sistema (unidades/hm³)
- p_2 = benefício associado à produção de energia. Para as unidades de bombeamento, o benefício é um “custo” associado ao consumo de energia.

A formulação (1)-(9) caracteriza um problema de programação matemática quadrático-inteiro, resolvido por um modelo comercial chamado Xpress (Dash Optimization). Será bastante oportuna a utilização desta ferramenta no presente estudo.

2.6.7. Estudos hidrodinâmicos

O modelo hidrodinâmico usado neste estudo será o pacote do sistema de modelagem do US Army Corps of Engineering TABS-MD/RMA-2/RMA-4 (informações em http://smig.usgs.gov/cgi-bin/SMIC/browse_models). Este sistema é equivalente a muitos outros modelos existentes e disponíveis no mercado, já que usa métodos consagrados de solução de equações (métodos de elementos finitos) e resolve as mesmas equações hidrodinâmicas (equações de Navier-Stokes/Reynolds médias) que outros modelos.

As quatro equações necessárias para calcular as quatro incógnitas da circulação hidrodinâmica, velocidade na direção x , velocidade na direção y , velocidade na direção z e elevação da superfície livre (u, v, w, ζ , respectivamente), se baseiam nas equações abaixo:

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \operatorname{sen}\theta v \quad (1)$$

Equação da quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \operatorname{sen}\theta u \quad (2)$$

Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (4)$$

Onde u , v e w são, respectivamente, as velocidades nas direções x , y e z , ρ_0 é uma densidade constante de referência, Φ é a velocidade angular de rotação da terra no sistema de coordenadas local e os termos com Φ são as forças de Coriolis, no qual θ é o ângulo de Latitude. ζ é a elevação da superfície livre, τ_{ij} são as tensões de cisalhamento e h é a profundidade.

Tais equações são integradas na vertical o que produz um modelo nas coordenadas horizontais e temporal, com incógnitas iguais às componentes das velocidades médias na vertical, na direção x e y , respectivamente, $U(x,y,t)$ e $V(x,y,t)$ e as elevações da superfície livre $z=\zeta(x,y,t)$, conforme as seguintes equações:

Equação da quantidade de movimento, para escoamento integrado na vertical, na direção x :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^S - \tau_x^B) + 2\Phi \operatorname{sen} \theta V \quad (5)$$

Equação da quantidade de movimento, para escoamento integrado na vertical, na direção y :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial (H \bar{\tau}_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (H \bar{\tau}_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^S - \tau_y^B) - 2\Phi \operatorname{sen} \theta U \quad (6)$$

onde H é a profundidade, τ_i^S e τ_i^B são as tensões de atrito na superfície (devido ao vento) e no fundo, respectivamente. O índice i representa a direção, por exemplo: $i=1$ componente x , $i=2$ componente y e $i=3$, a componente z .

Todas as tensões de Reynolds (τ_{ij}) são modeladas usando um modelo de fechamento de turbulência conhecido por k-e.

As equações acima são discretizadas para pontos (nós) em uma malha de elementos finitos triangulares com 6 nós cada. Entre os pontos de cada elemento, as incógnitas do problema são calculadas com um polinômio de segundo grau. Este é o método de elementos finitos.

Na modelagem da circulação hidrodinâmica, é necessário o estabelecimento de condições de contorno para o campo de velocidade e elevação da superfície livre da água.

Nos contornos de terra (rios e reservatórios), são prescritas condições de contorno para o campo de velocidade, que podem ser a determinação da componente de velocidade (UN) ou de vazão (QN) normal ao contorno.

As condições iniciais necessárias são os valores da elevação da superfície livre (ζ) e as componentes da velocidade, U e V , para todos os nós do domínio.

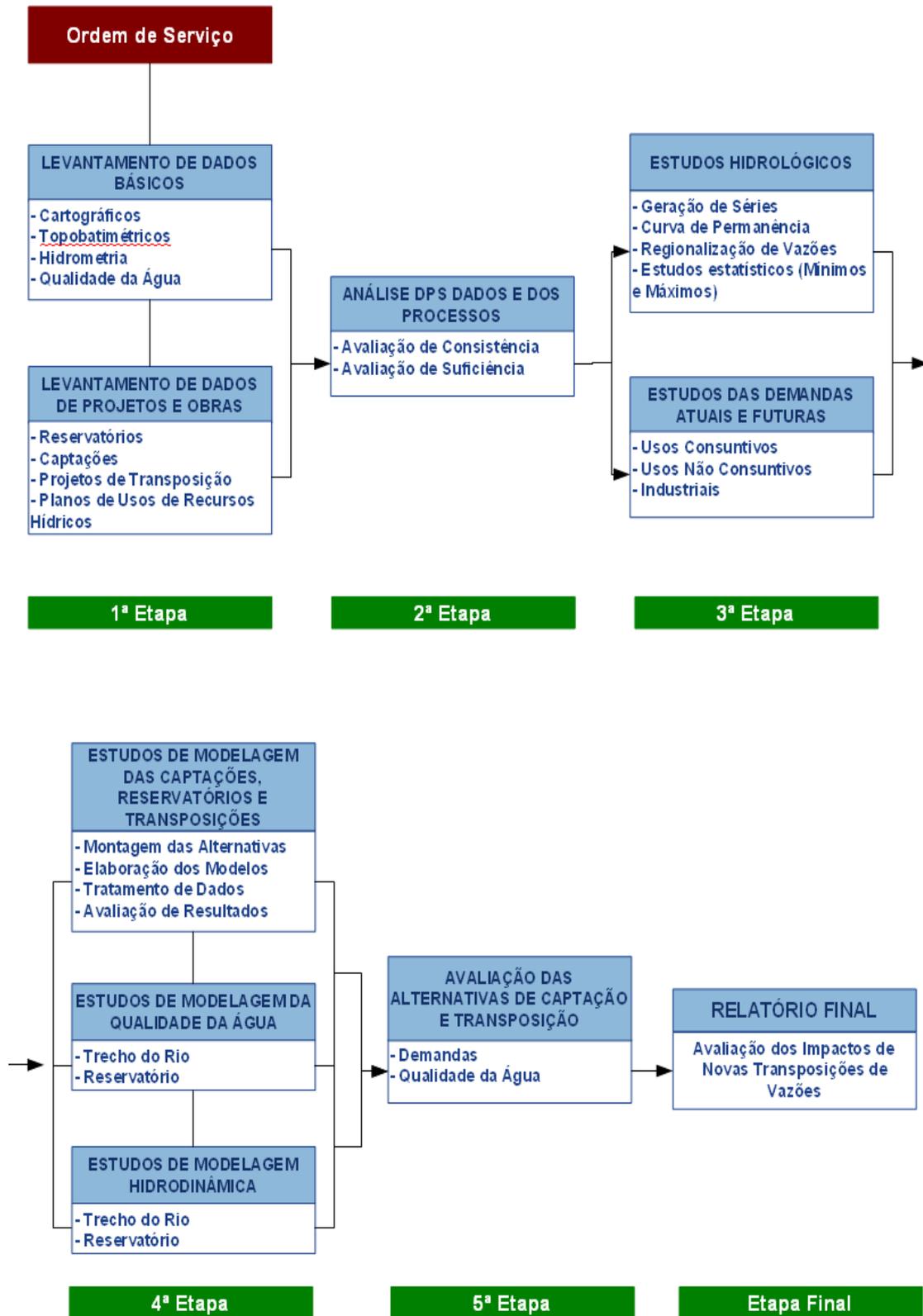
O modelo consiste em uma equação de advecção-difusão para um escalar qualquer, particularmente para a concentração de sedimento. A equação geral para a modelagem bidimensional é apresentada abaixo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} - E \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = f(c_j, x, y, t)$$

Onde C é a concentração da substância de interesse (sedimento), U e V são as componentes da velocidade nas direções x e y integradas na direção vertical, E é o coeficiente de difusão turbulenta e $f(c_j, x, y, t)$ é o somatório de fontes, sumidouros, sedimentações e eventuais reações cinéticas entre as várias componentes presentes no modelo.

Novamente, é preciso especificar condições de contorno em toda a fronteira do domínio, e também condições iniciais para todos os nós.

3. FLUXOGRAMA



4. CRONOGRAMA

O Cronograma das Atividades apresentada anteriormente encontra-se exemplificado conforme a tabela a seguir. Nesta, pode-se perceber os produtos relacionados ao desenvolvimento do trabalho, denominado por R1, R2, R3 e assim suscetivamente.

Os relatórios serão entregues à AGEVAP todo dia 30 dos meses relacionados com entrega de produto e apresentados na semana seguinte, tanto para a AGEVAP quanto para o GTAOH. Caso haja alguma modificação, a AGEVAP enviará o pedido para retificação em até 15 dias para correção dos produtos e a PSR reenviará o produto final em até 5 dias. Em caso de modificações por parte do GTAOH, estes deverão ser enviados em até 15 dias, adotando o mesmo procedimento anterior.

Atividades e Produtos	Meses								
	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º
I - Plano de Trabalho	R1								
II - Levantamento de Dados			R2						
III - Demandas Atuais e Futuras					R3				
IV - Estudos Hidrológicos					R4				
V - Estudos de Qualidade da Água						R5			
VI- Modelagem Hidrodinâmica								R6	
VII - Relatório final consolidado									RF

5. CONCLUSÃO

Nesse capítulo final se procurou ilustrar o quadro de intervenções já instaladas e aquelas previstas para geração hidrelétrica na bacia, bem como as dificuldades na obtenção de dados.

5.1. Cenários de reservatórios e de geração hidrelétrica

Pelo potencial hidráulico do rio Paraíba do Sul e pela proximidade dos centros de carga, praticamente todas as intervenções implantadas na bacia referem-se à usinas hidrelétricas.

Para definição dos cenários de geração hidrelétrica, foram consideradas as condições iniciais do SIN, isto é, as usinas hidrelétricas em operação com potência superior a 30 MW e as premissas conjunturais estabelecidas pelo PDEE 2006-2015, produzido pela EPE.

A geração hidrelétrica incremental, no PDEE 2006-2015, foi elaborada a partir de programas de obras decorrentes das licitações de concessões já realizadas, das autorizações para usinas concedidas pela Aneel, de informações sobre as próximas licitações previstas e de usinas com projetos em estágio de viabilidade e de inventário. As datas mínimas previstas na expansão dos projetos foram obtidas em consonância com a avaliação socioambiental e os prazos estimados de todas as etapas do projeto e de licenciamento até o início de operação da primeira unidade geradora.

A potência total instalada para o cenário de longo prazo na bacia do rio Paraíba do Sul foi estimada em aproximadamente 3.133 MW, sendo 2.083 MW das usinas maiores e 1.050 MW das pequenas centrais.

No caso da bacia do rio Paraíba do Sul existe uma particularidade que a distingue de todas as outras estudadas: a existência de transposições de vazões, tais como em Canais de Campos ou em Santa Cecília, sendo esta última realizada a partir de uma captação após o barramento, nas proximidades da cidade de Barra do Pirai, e de uma barragem no rio Pirai. Essas estruturas hidráulicas possibilitam a inversão do curso do rio Pirai e a transferência de até 160 m³/s das águas do rio Paraíba do Sul.

Essa transposição associada a outras estruturas hidráulicas em bacias vizinhas a do Paraíba do Sul, com drenagem para o Oceano Atlântico, já na bacia do rio Guandu e seus formadores, possibilita a geração de energia nas seguintes usinas:

Nome	Rio	Estágio	Regime de operação	Potência (MW)
Nilo Peçanha	Ribeirão das Lajes	Operação	fio d'água	380,0
Fontes Nova		Operação	fio d'água	132,0
Lajes		Viabilidade	fio d'água	18,0
Pereira Passos		Operação	fio d'água	100,0
Paracambi		Projeto Básico	fio d'água	30,0

Tabela 2: Usinas na bacia do rio Guandu

Este dado pode ser considerado um caso muito particular de empreendimentos hidrelétricos, pois o benefício da geração de energia se dá na bacia do rio Guandu e de seus formadores, como já mencionado, mas os impactos dos reservatórios e estruturas hidráulicas, para que essa transposição seja possível, estão localizadas nos rios Paraíba do Sul e Pirai. Os reservató-

rios são: Santa Cecília, Tócos, Vigário e Santana, e suas características principais estão apresentadas no Tabela 2 conjuntamente aos das usinas assinaladas ou consideradas para o cenário de curto prazo.

Na seleção de usinas e inclusão nos diversos cenários de geração hidrelétrica da bacia do rio Paraíba do Sul foram adotados os seguintes critérios:

- No cenário atual (curto prazo), foram incluídas todas as usinas com potência superior a 30 MW existentes ou já com concessão do aproveitamento estabelecida e que tivessem também viabilidade ambiental aprovada (licença prévia).
- No cenário de médio prazo, foram incluídos adicionalmente todos os aproveitamentos hidrelétricos com potência superior a 30 MW que aparecem no PDEE 2006-2015, mas que ainda não têm uma concessão estabelecida para o empreendimento ou que não dispõem de licença prévia.
- Para o cenário de longo prazo, foram consideradas todas as usinas com potência superior a 30 MW que fazem parte de estudos de inventário hidrelétrico disponíveis e aprovados, mas que ainda não avançaram no processo de aprovação técnica-econômica e ambiental.

Vale ressaltar que os cenários propostos a partir deste Trabalho será descrito no intervalo de 2010 até 2030, tendo em vista a possível existência de estudos ou planejamentos que trata da possibilidade e necessidade de utilizar a água proveniente do Guandu, principalmente em 2014 e 2016 devido aos eventos de Copa do Mundo e Olimpíadas respectivamente.

Nesse sentido, conforme apresentado no capítulo 2.3. Demandas atuais e futuras, serão elaborados os cenários: atual e dois para futuro (10 e 20 anos) – no final serão 06 cenários – os três (atual, 10 e 20 anos) com ou sem transposição.

5.1.1. Cenário atual (ou de curto prazo)

A bacia do rio Paraíba do Sul tem nove aproveitamentos hidrelétricos (acima de 30 MW) em operação: Paraibuna-Paraitinga, Santa Branca, Funil, Picada, Sobragi, Simplicio, Ilha dos Pombos, Nova Maurício e Barra do Braúna.

A Figura 6 apresenta a localização dos nove empreendimentos que compõem o cenário atual da bacia do rio Paraíba do Sul, totalizando 1.054,8 MW de potência instalada.

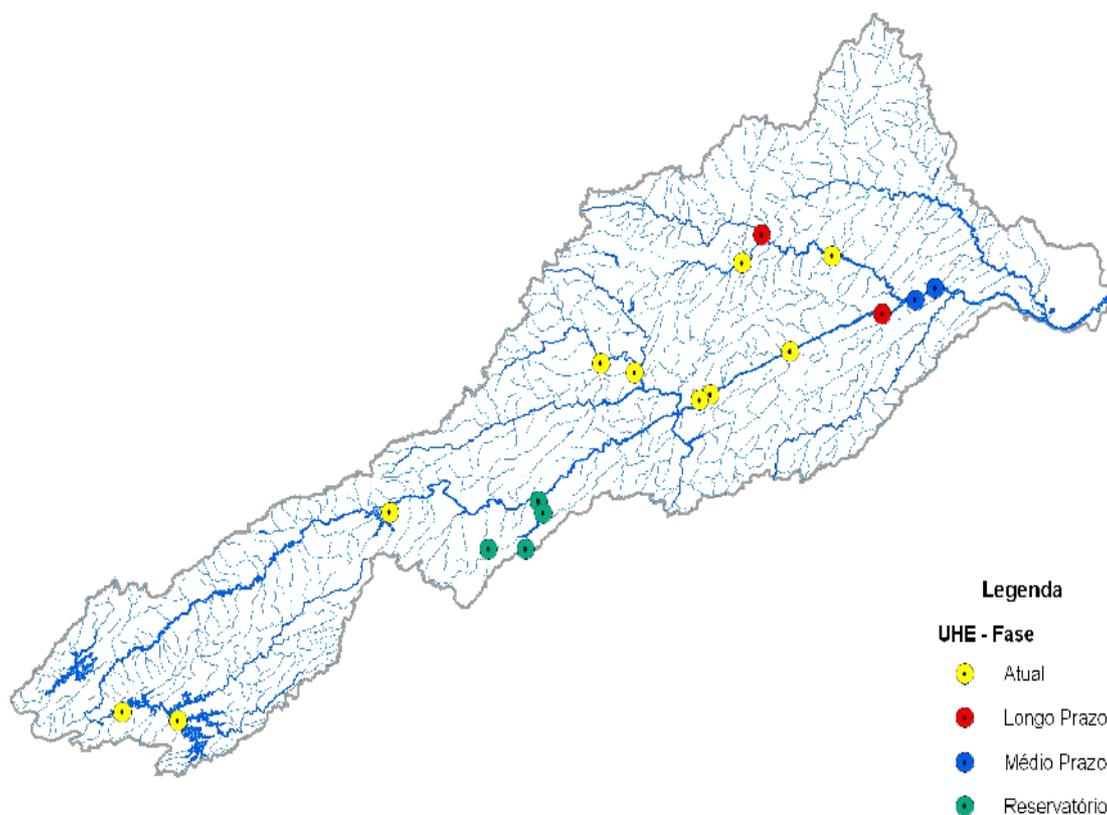


Figura 6: Empreendimentos (UHE) na bacia do rio Paraíba do Sul

Pode-se observar na figura que a maioria desses empreendimentos (três usinas) está localizada na região do Alto e Médio Paraíba do Sul.

O Tabela 3 a seguir apresenta de forma sumariada o cenário atual:

Nome	Rio	Estágio	Regime de operação	Altura da barragem (m)	Potência (MW)	Área do reservatório (km ²)	Tempo de residência (dias)
Paraibuna-Paraitinga	Paraíba do Sul	Operação	regularização	87,6	85,0	177,2	794
Santa Branca		Operação	regularização	44,8	50,0	27,0	63
Funil		Operação	regularização	85,0	222,0	39,0	44
Santa Cecília		Operação	fio d'água	10,0	Sem geração	2,7	0,2
Tócos	Piraí	Operação	regularização	20,0	Sem geração	0,5	2
Vigário		Operação	fio d'água	36,0	Sem geração	4,0	3
Santana		Operação	fio d'água	15,0	Sem geração	4,7	7
Picada	Peixe	Operação	fio d'água	10,0	50,0	1,1	0,2
Sobragi	Paraibuna	Operação	fio d'água	7,5	60,0	0,1	0,01
Simplicio	Paraíba do Sul	Construção	fio d'água	33,0	333,7	15,3	4
Ilha dos Pombos		Operação	fio d'água	9,5	183,0	4,0	0,2

Nome	Rio	Estágio	Regime de operação	Altura da barragem (m)	Potência (MW)	Área do reservatório (km ²)	Tempo de residência (dias)
Nova Maurício		Operação	regularização	20,0	32,1	3,4	8
Barra do Braúna	Pomba	Com Concessão	fio d'água	24,4		8,5	3

Tabela 3: UHE Reservatórios – Cenário atual

Fonte: Relatório de acompanhamento de estudos e projetos de usinas hidrelétricas, realizado pela Aneel, situação em 19/01/2007.

5.1.2. Cenário de médio prazo

Nesse cenário foram incluídos todos os aproveitamentos hidrelétricos com potência superior a 30 MW previstos no PDEE 2006-2015, mas que ainda não estão concessionados ou que mesmo concessionados não dispõem de viabilidade ambiental aprovada, e, portanto não detêm a licença prévia (LP).

Nessa condição estão três aproveitamentos: AHE Itaocara, Barra do Pomba e Cambuci no rio Paraíba do Sul, que foram concessionados e por ainda não dispor de licença prévia emitida pelo órgão ambiental, que somam 325 MW.

Nome	Rio	Estágio	Regime de operação	Altura da barragem (m)	Potência (MW)	Área do reservatório (km ²)	Tempo de residência (dias)
Itaocara	Paraíba do Sul	Viabilidade	fio d'água	46,0	195,0	76,1	22
Barra do Pomba		Viabilidade	regularização	10,9	80,0	5,5	1,5
Cambuci		Operação	regularização	9,5	50,0	5,7	0,5

Tabela 4: UHE – Cenário de médio prazo

Fonte: Relatório de acompanhamento de estudos e projetos de usinas hidrelétricas, realizado pela Aneel, situação em 19/01/2007.

5.1.3. Cenário de longo prazo

Para o horizonte de 2025, está prevista a implantação de apenas mais uma usina: o AHE Monte Cristo no rio Pomba, com potência instalada de 33 MW.

No entanto, nesse cenário estão previstas e identificadas 117 PCH, sendo que 30 delas já estão em operação, 4 em construção e 83 identificadas a nível de inventário

Os reservatórios das PCH são de pequeno porte, apresentando áreas de inundação reduzidas. Como consequência, fica minimizada, por exemplo, a possibilidade de perda de áreas florestadas e de realocação de moradias e estruturas urbanas.

Os reservatórios com menores volumes tendem a apresentar, por exemplo, uma pequena capacidade de retenção de sedimentos e nutrientes, minimizando as alterações no comportamento hidrossedimentológico e na qualidade da água dos cursos d'água.

Uma outra característica das PCH é o fato de serem projetadas para operar a fio d'água, isto é, em um balanço hídrico diário, e os volumes totais afluentes serem iguais aos volumes totais defluentes. Como resultado dessa regra operativa, a modificação no regime fluvial do curso d'água fica minimizada, não havendo modificação numa escala semanal, mensal ou sazonal.

Por outro lado, a implantação dos reservatórios das PCH provoca modificações semelhantes à de uma usina de maior porte, como por exemplo, a redução das velocidades no trecho de remanso do reservatório e o conseqüente aumento da deposição de material sólido na entrada do reservatório. Com isso, os níveis d'água à montante podem subir mais em relação às condições naturais, durante as cheias comuns, tendo como conseqüência o risco de aumento na frequência de inundações nas áreas ribeirinhas.

Quando o arranjo da usina apresenta desvio de vazões para melhor aproveitamento da queda, uma solução de engenharia muito comum em PCH, um trecho de rio entre a barragem e o canal de fuga fica com suas vazões bastante reduzidas em parte do tempo ao longo do ano.

A própria operação das PCH, apesar das alterações serem muito mais localizadas que as de uma usina com regularização de vazões, também pode provocar modificações no regime fluvial, quando a usina opera fazendo modulação da ponta de consumo de energia elétrica. Para isso, são retidas pequenas parcelas das vazões afluentes durante a maior parte do dia, para que esses volumes aumentem as vazões turbinadas durante o período de 18 às 21 horas, quando aumenta o consumo de energia elétrica. Essa regra operativa resulta na variação horária dos níveis d'água no reservatório e das vazões e níveis d'água no trecho fluvial à jusante da usina.

Apesar de suas reduzidas dimensões e a existência de impactos bem localizados, pode-se inferir que num determinado trecho de curso d'água onde estão previstas a implantação de um grande número de PCH, podem surgir efeitos cumulativos e sinérgicos resultantes desse conjunto de usinas, e que em muitos casos podem se tornar comparáveis aos de uma usina hidrelétrica de médio porte.

As tabelas a seguir mostram o resumo das características principais das usinas e PCH para esse cenário.

Nome	Rio	Estágio	Regime de operação	Altura da barragem (m)	Potência (MW)	Área do reservatório (km ²)	Tempo de residência (dias)
Itaocara	Paraíba do Sul	Viabilidade	fio d'água	46,0	195	76,1	22
Monte Cristo	Pomba	Inventário	fio d'água	35,4	33,0	4,40	5

Tabela 5: UHE – Cenário de longo prazo

Fonte: Relatório de acompanhamento de estudos e projetos de usinas hidrelétricas, realizado pela Aneel, situação em 19/01/2007:

Nome	Rio	Fase
CHALÉ	PARAÍBA DO SUL	
LAVRINHAS		
QUELUZ		
LÍDICE	DO BRAÇO	

PLANO DE TRABALHO – TRANSPOSIÇÃO DE VAZÕES DO PARAÍBA DO SUL

Nome	Rio	Fase
BRAÇO		
FAZENDA SANTANA		
PROVIDÊNCIA	PRETO 2	
POÇO FUNDO		
CAPIM	CAPIM	
MORRO GRANDE (AREAL)	PRETO 2	Oper.
POSSE		
SÃO SEBASTIÃO	PIABANHA	
MONTE ALEGRE		
PIABANHA		Oper.
SECRETÁRIO	FAGUNDES	
CORONEL FAGUNDES		Oper.
FERREIRA GUIMARÃES	SÃO PEDRO	Oper.
MARMELOS 1-2		Oper.
JOASAL	PARAIBUNA	Oper.
PACIÊNCIA		Oper.
ÁGUA FRIA	DO PEIXE	
VISTA ALEGRE		
CALO	DO CALO	
PEREIRA		
GROTINHA		
ENGENHO	BRUMADO	
COXO		
CACHOEIRA DO BRUMADO		
MONTE VERDE	SANTA BÁRBARA	
SANTA BÁRBARA		
MONTE VERDE		
SERRINHA	PEIXE	
COTEGIPE		
MATO LIMPO		
PONTE		
CAPELA	SANTANA	
MELLO		Oper.
REZENDE		
BOLSA	RIBEIRÃO CONCEIÇÃO	
ALÇA		
MONTE SERRAT		Const.
BONFANTE	PARAIBUNA	Const.
SANTA FÉ		Const.
BOA VISTA		
BARRILHA	ANGÚ	
FOZ DO ANGÚ		
ERVÁLIA	DOS BAGRES	Oper.
ITUERÉ		
ITUERÉ		Oper.
BOM SUCESSO		
PONTE	POMBA	Oper.
PALESTINA		Oper.
BARRA DOS CARRAPATOS		
IVAN BOTELHO III (Triunfo)		Oper.

PLANO DE TRABALHO – TRANSPOSIÇÃO DE VAZÕES DO PARAÍBA DO SUL

Nome	Rio	Fase	
PIAU	PIAU	Oper.	
ANA MARIA	PINHO	Oper.	
GUARY		Oper.	
LAJE	NOVO		
ARACI			
CATAGUASES	POMBA		
BELA VISTA			
ESTIVA			
PARAOQUENA			
CACHOEIRA ALEGRE			
BALTASAR			
FRECHEIRAS			
APERIBÉ			
NOVO XAVIER		GRANDE	
XAVIER			Oper.
RIO GRANDINA			
SANTO ANTÔNIO			
SANTA ROSA II	Const.		
SOSSEGO			
BONANÇA			
JAMBO			
S.S DO ALTO			
CAJU			
BOA VISTA	NEGRO		
PIMENTEL I		Oper.	
CHAVE DO VAZ		Oper.	
EUCLIDELÂNDIA	PRETO		
CACHOEIRA DA FUMAÇA			
SANTA ROSA 1			
PRETO 4			
PRETO 1			
CARANGOLA	CARANGOLA		
SÃO LOURENÇO			
TOMBOS (Ampliação)		Oper.	
HANS	SANTO ANTÔNIO	Oper.	
SÃO PEDRO	GLÓRIA		
BICÚIBA			
SÃO FRANCISCO DO GLÓRIA			
MARIANO			
SANTA CRUZ			
GLÓRIA		Oper.	
CACHOEIRA ENCOBERTA (ORMEU JUNQUEIRA BOTELHO)		Oper.	
COMENDADOR VENÂNCIO	MURIAÉ		
ITAPERUNA			
ARÉ			
PARAÍSO			
SÃO JOAQUIM			
ITALVA			
CORONEL DOMICIANO (AMPLIAÇÃO)	SEM PEIXE	Oper.	
CATETE	BENGALA	Oper.	

Nome	Rio	Fase
CABUÍ	PARAIBUNA	

Tabela 6: PCH do Cenário de longo prazo

Fonte: Relatório de acompanhamento de estudos e projetos de usinas hidrelétricas, realizado pela Aneel, situação em 19/01/2007.

A Figura 7 apresenta a consolidação dos aproveitamentos hidrelétricos existentes e previstos na bacia do rio Paraíba do Sul, classificados segundo o cenário de implantação.

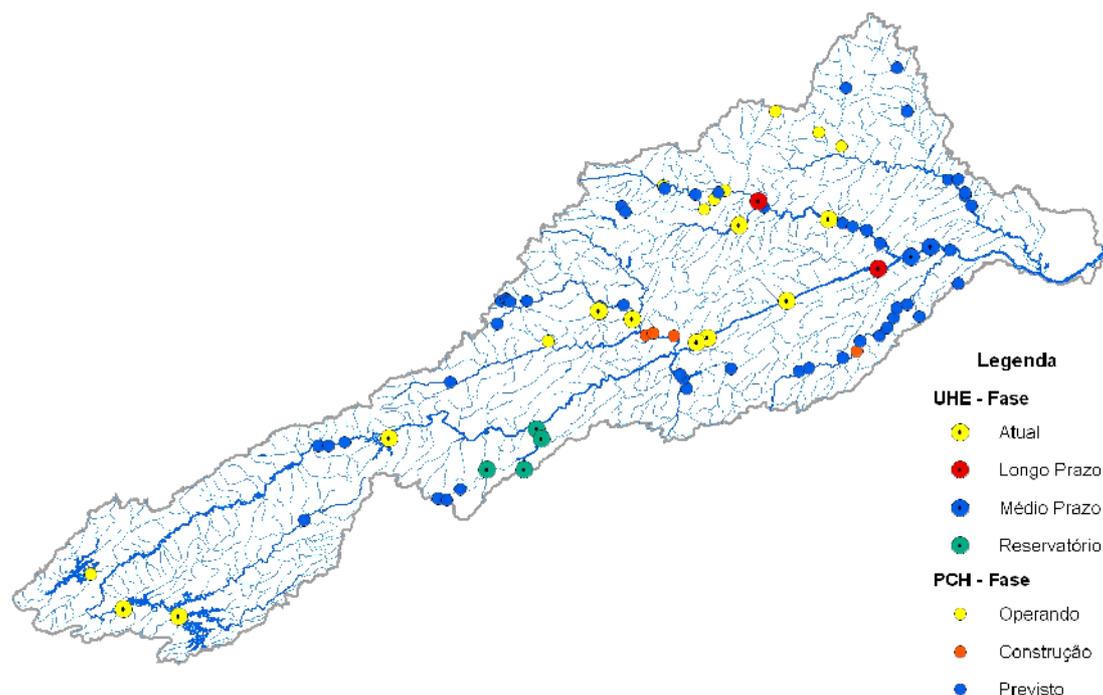


Figura 7: Empreendimentos da bacia do rio Paraíba do Sul segundo o cenário de implantação

5.2. Dificuldades na obtenção de dados

Com o conhecimento prévio de outros trabalhos e estudos na bacia já se podem elencar algumas dificuldades na obtenção de dados que podem acarretar a necessidade de adequação dos estudos e das modelagens para que se obtenham as respostas as consequências das captações e transposições previstas.

- Dados topobatimétricos de trechos de rio e dos reservatórios para modelagens hidrodinâmicas;
- Dados de qualidade da água;
- Dados de outorgas de água;
- E cartografia em escala adequada.