

Julio Issao Kuwajima

**Avaliação de Performance Computacional de  
Simplificações da Equação de Saint-Venant  
aplicadas na Operação da UHE Três Marias,  
MG.**

São Carlos, SP - Brasil

2016



Julio Issao Kuwajima

**Avaliação de Performance Computacional de  
Simplificações da Equação de Saint-Venant aplicadas na  
Operação da UHE Três Marias, MG.**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental

Universidade de São Paulo – USP

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC

Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental – PPG-SEA

Orientador: Prof. Assoc. Frederico Fábio Mauad

São Carlos, SP - Brasil

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

K97a KUWAJIMA, JULIO ISSAO  
Avaliação de Performance Computacional de  
Simplificações da Equação de Saint-Venant aplicadas na  
Operação da UHE Três Marias, MG. / JULIO ISSAO  
KUWAJIMA; orientador FREDERICO FÁBIO MAUAD. São Carlos,  
2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área  
de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2016.

1. EQUAÇÕES DE SAINT-VENANT. 2. OPERAÇÃO DE  
RESERVATÓRIOS. 3. GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS  
HÍDRICOS. 4. CONTROLE DE CHEIAS. 5. OTIMIZAÇÃO. I.  
Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JULIO ISSAO KUWAJIMA**.

Título da tese: "Avaliação de performance computacional de simplificações da equação de Saint-Venant aplicadas na operação da UHE Três Marias, MG".

Data da defesa: 09/12/2016.

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Associado **Frederico Fábio Mauad**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Cristiano Poletto**  
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

Reprovado

Prof. Dr. **Tiago Zenker Gireli**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Reprovado

Prof. Dr. **Alberto Luiz Francato**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Dr. **Guilherme de Lima**  
(NHC Brasil Consultores)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

*Eu dedico este trabalho, fruto de muito esforço intelectual e emocional,  
à todas as pessoas interessadas nele.*

*Também uma dedicação especial aos meus pais que foram uma fonte inesgotável de apoio  
moral, emocional e financeiro durante este período de minha vida.*

# Agradecimentos

Eu agradeço primeiramente ao meu orientador e meu amigo durante muitos anos, o Prof. Associado Frederico Fábio Mauad, por sempre acreditar no meu potencial e na minha pesquisa mesmo quando eu mesmo estava cheio de dúvidas.

Muitas pessoas foram importantes e contribuíram intelectualmente para este trabalho, eu começo os agradecimentos pelos meus colegas do Núcleo de Hidrometria, o Dr. Renato Billia de Miranda, Dr. Gustavo D’Almeida Scarpinella e Marcus Vinícius Estigoni, este último com um agradecimento especial por ter sempre sido um grande amigo durante toda minha carreira acadêmica.

Sou muito grato à orientação do Prof. Dr.-Ing André Niemann do Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (WaWi)<sup>1</sup> na Universität Duisburg-Essen, onde tive o prazer de trabalhar com excelentes colegas como Rodolfo Alvarado Monteiro, Timo Wortberg, Viktoria Berger, Julian Binias, Daniel Teschlade e Dr. Fernando Mainardi Fan. Não posso também deixar um agradecimento especial ao Dr.-Ing Dirk Schwanenberg da Deltares <sup>2</sup> que teve um papel fundamental na supervisão e nos resultados desta pesquisa.

Devo também agradecimentos a todos os funcionários do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA), do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental (PPG-SEA)<sup>3</sup> e da Escola de Engenharia de São Carlos<sup>4</sup>, que durante muitos anos sempre estiveram disponíveis para nos ajudar.

E por último um agradecimento a CAPES por ter financiado minha pesquisa, possibilitando minha estágio doutoral em na Alemanha, ao pessoal da Deltares (Holanda) que me forneceu *know-how* e por último à CEMIG por ter fornecido os dados usados na minha pesquisa.

---

<sup>1</sup> Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft <<https://www.uni-due.de/wasserbau/index.php>>

<sup>2</sup> Deltares <<https://www.deltares.nl/>>

<sup>3</sup> PPG-SEA<<http://www1.eesc.usp.br/ppgsea/>>

<sup>4</sup> Escola de Engenharia de São Carlos<<http://www.eesc.usp.br/portaleesc/>>





*„We can only see a short distance ahead,  
but we can see plenty there that needs to be done.“*

Alan M. Turing (1912-1954)



# Resumo

KUWAJIMA, J.I. **Avaliação de Performance Computacional de Simplificações da Equação de Saint-Venant aplicadas na Operação da UHE Três Marias, MG.** 2016. 335. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (EESC-USP) São Carlos, SP - Brasil, 2016.

O gerenciamento integrado de recursos hídricos envolve partes com usos conflitantes entre si. Portanto o gerenciamento eficiente dos reservatórios é importante para atender múltiplos objetivos operacionais: abastecimento hídrico, navegação, geração hidroelétrica, requisitos ambientais e controle de cheias. Recentemente desenvolvimentos na previsão numérica climática, dados de radares meteorológicos e aquisição de dados hidrológicos e meteorológicos on-line resultaram em um crescente interesse em processamento de importação de dados. Implementando controle preditivo com horizonte de previsão de curto prazo, é possível prever condições de estresse ou de pico de vazão, que auxilia os tomadores de decisão a agir antecipadamente, assim minimizando os impactos negativos destes eventos. Para eventos de cheia, os operadores podem verter previamente água do reservatório alocando volume de reservação adicional para mitigar os danos de inundação nas margens à jusante do corpo d'água. Neste cenário, para obter estimativas do escoamento a jusante referentes às mudanças de vertimento do reservatório, é necessário um modelo de escoamento robusto e rápido. Avaliou-se neste contexto cinco modelos diferentes quanto suas potencialidades de implementação em um modelo de controle preditivo para o reservatório de Três Marias, localizado na bacia do Alto São Francisco, Brasil. Estes modelos são: i) SOBEK que utiliza a equação hidrodinâmica de Saint-Venant; ii) SPRNT que utiliza a equação hidrodinâmica de Saint-Venant utilizando técnicas de aceleração para cálculo; iii-) MGB-IPH (Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - Instituto de Pesquisas Hidráulicas), modelo chuva-vazão semi-distribuído que utiliza o método de Muskingum-Cunge para determinar o escoamento nos canais de interesse; iv) um modelo de onda difusiva; e v) um modelo simplificado de propagação de ondas em reservatório, equivalente à onda cinemática. Os dois últimos modelos estão implementados no pacote de ferramentas do RTC-Tools, a ferramenta de cálculo de controle em tempo real. Em geral os resultados entre os modelos simplificados do RTC-Tools e o modelo mais sofisticado SOBEK são comparáveis, no entanto os dois métodos com abordagem hidráulica, SOBEK e o modelo difusivo do RTC-Tools, apresentam difusão numérica por causa da baixa resolução espacial. No modelo de propagação de vazão por reservatórios simples a adoção de advecção pura através de um retardamento temporal mostrou-se uma correção eficiente para a difusão numérica excessiva apesar da baixa resolução espacial. Do ponto de vista de controle preditivo, esta abordagem possui melhor “custo-benefício” entre robustez, eficiência computacional e precisão.

**Palavras-chave:** Eq.de Saint-Venant. Modelos Hidrológicos. Otimização para controle de cheias.



# Abstract

**KUWAJIMA, J.I. CPU Performance Evaluation of Saint-Venant Equations Simplifications applied to the Três Marias Dam Operation.** 2016. 335. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (EESC-USP) São Carlos, SP - Brasil, 2016.

Integrated Water Resources Management involves parties with conflicting interests. Therefore an effective reservoir management is important to meet multiple operating objectives such as water supply, navigation, hydroelectricity generation, environmental obligations and flood protection. Recent upcomings in numerical weather forecast, radar data and online data acquisition resulted in an interest for data import processes. By implementing a predictive control approach over a short-term forecast horizon, it is possible to foresee stress conditions or peak flow events and support decision-makers to take actions before these events happen to minimize their negative impacts. In the case of flood events, this technique enables the operators to pre-release water from a reservoir for allocating additional storage before the flood event occurs in order to mitigate flood damage along downstream river reaches. In this scenario, a robust and fast routing model is required to obtain quick and reliable estimates of downstream flow conditions related to release changes of the reservoir. In this context, five different models are assessed concerning their implementation in a predictive control of the Três Marias reservoir located at the Upper River São Francisco in Brazil: i) a fully dynamic model using the software package SOBEK; ii)SPRNT a fully dynamic model using acceleration calculation techniques; iii) a semi-distributed rainfall-runoff model with Muskingum-Cunge routing for the flow reaches of interest, known as MGB-IPH (Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - Instituto de Pesquisas Hidráulicas); iv) a diffusive wave model and v) Kinematic Wave equivalent simplified reservoir routing. The last two models are implemented in the RTC-Tool toolbox, a software for real-time control applications. In general, we find comparable results between the simplified models in RTC-Tools and the more sophisticated SOBEK model and a lower performance of the MGB model. However, both hydraulic modelling approaches, i.e. the SOBEK model as well as the diffusive wave model in RTC-Tools, suffer from too much numerical diffusion in case of course grids. In the reservoir routing approach, the introduction of pure advection by time lags offers an efficient solution for excessive numerical diffusion even on courser grids. From the predictive control point of view, this approach shows the best compromise in terms of robustness, computational efficiency and accuracy.

**Keywords:** Saint-Venant Equations. Hydraulic Routing. Optimization for Flood Control.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira em 2015. . . . .	35
Figura 2 – Comparação da Participação de Fontes de Energias Renováveis na Matriz Elétrica. . . . .	58
Figura 3 – Evolução do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (1970-2014). . . . .	59
Figura 4 – Integração Eletroenergética Brasileira. . . . .	61
Figura 5 – Horizontes de Previsão para o NEWWAVE, DECOMP e DESSEM . . . . .	64
Figura 6 – Esquema das Etapas do Processo de modelagem. . . . .	68
Figura 7 – Conceitualização do modelo SAC-SMA, ilustrando os armazenamentos de umidade do solo, componentes de escoamento superficial e trocas entre superfície do solo e atmosfera . . . . .	71
Figura 8 – Exemplo de modelação integrada de bacia hidrográfica utilizando combinação de modelos compatíveis à OpenMI . . . . .	82
Figura 9 – Representação conceitual do volume de armazenamento para o método de Muskingum . . . . .	90
Figura 10 – Representação de discretizações em grade para Operadores de Diferença posterior, anterior e central (eixo horizontal representa espaço e o vertical o tempo) . . . . .	92
Figura 11 – Representação de um esquema de discretização <i>Crank Nicholson</i> . . . . .	93
Figura 12 – Representação de uma seção Simplificada de um escoamento de canal aberto	95
Figura 13 – Variáveis de um Modelo de Controle Preditivo para a otimização do despacho hidrotérmico . . . . .	110
Figura 14 – Princípio do Controle Preditivo aplicado ao despacho hidrotérmico . . . . .	111
Figura 15 – Impacto de um forçamento externo $f$ , no estado do vetor do modelo de Lorenz (1963). (a) $f = 0$ , (b) $f = 2$ , (c) $f = 3$ e (d) $f = 4$ . . . . .	119
Figura 16 – Diagrama em Árvore conforme RASO. . . . .	123
Figura 17 – Diagrama em Árvore para de Sistemas de produção hidroelétrica e comercialização de energia no verão. . . . .	124
Figura 18 – A configuração do modelo de controle preditivo que pode ser feito no RTC-Tools utilizando otimizadores integrados. . . . .	133
Figura 19 – Esquema do Modelo Hidráulico SOBEK. . . . .	139
Figura 20 – Interface Gráfica de Resultados no Delft-FEWS. . . . .	146
Figura 21 – Esquema da arquitetura do sistema de previsão Delft-FEWS. . . . .	147
Figura 22 – Comunicação entre os modelos e a interface Delft-FEWS. . . . .	148
Figura 23 – Esquema da Arquitetura de Integração dos Modelos no Delft-FEWS. . . . .	149
Figura 24 – Estrutura esquemática do sistema de previsão de cheias integrando bancos de dados e modelos dentro do Delft-FEWS. . . . .	150

Figura 25 – Exemplo de um <i>Workflow</i> (fluxo de trabalho) mostrando o processo de previsão para uma simulação hidrodinâmica de uma bacia hidrográfica. . . . .	155
Figura 26 – Exemplo de um <i>Workflow</i> (fluxo de trabalho) mostrando os processos para a simulação. . . . .	156
Figura 27 – Local de Estudo UHE Três Marias, localizado no estado de Minas Gerais (MG).158	
Figura 28 – Efeitos de Inundação na cidade de Pirapora para vazões de 4.000 e 7.000 m <sup>3</sup> /s.160	
Figura 29 – Situações de Operação de Três Marias. . . . .	162
Figura 30 – Esquematização geral da modelagem da bacia hidrográfica do estudo de caso	163
Figura 31 – Arquitetura do modelo para o SSD e Previsão Estocástica . . . . .	165
Figura 32 – Localização das seções transversais para o Rio Abetés e Rio São Francisco.	166
Figura 33 – Visualização do MGB configurado no Delft-FEWS. . . . .	170
Figura 34 – Esquema da configuração da geometria para o SOBEK, com os transectos .	172
Figura 35 – Esquema da configuração da geometria para o SOBEK, com as contribuições laterais . . . . .	172
Figura 36 – Distribuição dos valores do coeficiente de <i>Manning</i> para a configuração SOBEK	173
Figura 37 – Curva-Chave para Pirapora Ponte (HxQ) . . . . .	175
Figura 38 – Esquema da configuração para onda difusa com resolução espacial grosseira	176
Figura 39 – Esquema da configuração para cascata de reservatórios . . . . .	176
Figura 40 – Comparação do modelo SPRNT com o SOBEK. . . . .	190
Figura 41 – Modelo Totalmente dinâmico (SOBEK) e Modelos de Onda Difusiva (Diffusive Wave - DW). . . . .	191
Figura 42 – Comparação dos Modelos Conforme a Variação Espacial e Temporal. . . . .	192
Figura 43 – Comparação das simulações adotando intervalos de tempo de de 10, 30 e 60 min - Onda Difusiva com Baixa Resolução Espacial (Diffusive Wave -DW30km). . . . .	192
Figura 44 – Comparação das simulações adotando intervalos de tempo de de 10, 30 e 60 min - Onda Difusiva com Alta Resolução Espacial (Diffusive Wave -DW10km).193	
Figura 45 – Comparação das simulações adotando intervalos de tempo de de 10, 30 e 60 min - Cascata de Reservatórios (Reservoir Routing -RR). . . . .	193
Figura 46 – Comportamento dos modelos em eventos de pico de cheia. . . . .	194
Figura 47 – Difusão Numérico dos modelos em eventos de variações de vazões. . . . .	195
Figura 48 – NSE para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW). . .	195
Figura 49 – R <sup>2</sup> para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW). . . .	196
Figura 50 – RMSE para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW). .	197
Figura 51 – Bias para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW). . .	197
Figura 52 – Custo Relativo de Processamento refinamentos temporais dos modelos de Onda Difusa (DW-10km e DW-30km). . . . .	198
Figura 53 – Custo Relativo de Processamento para refinamentos temporais do modelo de cascata de reservatórios (RR) . . . . .	199



Figura 54 – Resultados dos volumes do reservatório otimizados para o Cenário 1 . . . . .	202
Figura 55 – Cenário 1: Comparação entre vazões defluentes simuladas e observadas do Reservatório. . . . .	203
Figura 56 – Cenário 1: Comparação entre vazões simuladas e observadas no ponto de controle de Pirapora. . . . .	204
Figura 57 – Resultados dos volumes do reservatório otimizados para o Cenário 2 . . . . .	205
Figura 58 – Cenário 2: Comparação entre vazões defluentes simuladas e observadas do Reservatório. . . . .	206
Figura 59 – Cenário 2: Comparação entre vazões simuladas e observadas no ponto de controle de Pirapora. . . . .	207
Figura 60 – Defluências do Reservatório para os Cenários de Simulação . . . . .	208
Figura 61 – Afluências em Pirapora para os Cenários de Simulação . . . . .	209
Figura 62 – Tempo de Processamento por numero de intervalos de tempo de simulação para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW). . . . .	215



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Grandes Eventos de Inundação registrados na Europa, Ásia e América do Norte	39
Tabela 2 – Recursos e Reservas Energéticas Brasileiras em 2013. . . . .	58
Tabela 3 – Expansão hidrelétrica planejada (2015-2024). . . . .	60
Tabela 4 – Classificação de modelos hidráulicos segundo a sua dimensionalidade . . . . .	87
Tabela 5 – Componentes da Equação de Conservação de Movimento. . . . .	98
Tabela 6 – Características das Simplificações das Equações de Saint-Venant. . . . .	99
Tabela 7 – Modelos Selecionados & Equações Governantes. . . . .	131
Tabela 8 – Características da Usina Hidrelétrica de Três Marias. . . . .	159
Tabela 9 – Características das Turbinas da UHE Três Marias. . . . .	159
Tabela 10 – Resumo de Situação de Operação para o Reservatório de Três Marias. . . . .	161
Tabela 11 – Delimitação problema:trechos dos rios Abaetés e São Francisco modelados. . . . .	166
Tabela 12 – Comprimentos das margens e canal principal do rio Abaetés . . . . .	166
Tabela 13 – Comprimentos das margens e canal principal do rio São Francisco . . . . .	167
Tabela 14 – Parâmetros Fixos do MGB-IPH . . . . .	168
Tabela 15 – Parâmetros Calibráveis do MGB-IPH . . . . .	169
Tabela 16 – Configuração dos cursos d'água no SOBEK . . . . .	171
Tabela 17 – Configuração dos cursos d'água no SPRNT . . . . .	174
Tabela 18 – Seções transversais correspondentes aos nós do modelo difusivo com resolução grosseira (DW30km) . . . . .	177
Tabela 19 – Comprimento entre as seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW30km) . . . . .	177
Tabela 20 – Rugosidade das seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW30km) . . . . .	178
Tabela 21 – Seções transversais correspondentes aos nós do modelo difusivo com resolução refinada (DW10km) . . . . .	179
Tabela 22 – Comprimento entre as seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW10km) . . . . .	179
Tabela 23 – Rugosidade das seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW10km) . . . . .	180
Tabela 24 – Delimitações dos Volumes de Controle "Reservatórios" para a configuração de Cascata de Reservatórios . . . . .	180
Tabela 25 – Defasagem Temporal em unidades de tempo para Vazões entre os "Reservatórios" para as intervalos de simulação de 60, 30 e 10 minutos . . . . .	180
Tabela 26 – Restrições Inflexíveis definidas no Otimizador . . . . .	181
Tabela 27 – Restrições Flexíveis definidas no Otimizador . . . . .	181

Tabela 28 – Indicadores de Performance Computacional e Estatísticos utilizados para avaliar os resultados. . . . .	183
Tabela 29 – Modelos e Períodos de Simulações dos Resultados. . . . .	189
Tabela 30 – Cenários e Períodos de Otimizações. . . . .	189
Tabela 31 – Gasto Computacional e Performance dos modelos totalmente dinâmicos sem implementação de contribuições laterais (SOBEK & SPRNT). . . . .	190
Tabela 32 – Redução do Custo relativo de processamento para os modelos de onda difusiva e de cascata de reservatórios . . . . .	200
Tabela 33 – Descrição dos Cenários de Otimização . . . . .	201
Tabela 34 – Estatísticas das Otimizações com Horizonte de Previsão de 1 ano: Nível de Água da Represa. . . . .	210
Tabela 35 – Estatísticas das Otimizações com Horizonte de Previsão de 1 ano: Vazão de Saída da UHE Três Marias. . . . .	210
Tabela 36 – Estatísticas das Otimizações com Horizonte de Previsão de 1 ano: Vazão no Ponto Pirapora. . . . .	210
Tabela 37 – Critérios para caracterização da Situação de Operação no período de controle de cheias - PCC (Parte I). . . . .	240
Tabela 38 – Critérios para caracterização da Situação de Operação no período de controle de cheias - PCC (Parte II). . . . .	241
Tabela 39 – Características Geométricas da Seção 35200 do Rio Abaetés . . . . .	246
Tabela 40 – Características Geométricas da Seção 34000 do Rio Abaetés . . . . .	247
Tabela 41 – Características Geométricas da Seção 30100 do Rio Abaetés . . . . .	248
Tabela 42 – Características Geométricas da Seção 24200 do Rio Abaetés . . . . .	249
Tabela 43 – Características Geométricas da Seção 20400 do Rio Abaetés . . . . .	250
Tabela 44 – Características Geométricas da Seção 19300 do Rio Abaetés . . . . .	251
Tabela 45 – Características Geométricas da Seção 16500 do Rio Abaetés . . . . .	252
Tabela 46 – Características Geométricas da Seção 12400 do Rio Abaetés . . . . .	253
Tabela 47 – Características Geométricas da Seção RA0 do Rio Abaetés - Parte I . . . . .	254
Tabela 48 – Características Geométricas da Seção RA0 do Rio Abaetés - Parte II . . . . .	255
Tabela 49 – Características Geométricas da Seção SF159600 do Rio São Francisco . . . . .	256
Tabela 50 – Características Geométricas da Seção SF156000 do Rio São Francisco . . . . .	257
Tabela 51 – Características Geométricas da Seção SF153200 do Rio São Francisco . . . . .	258
Tabela 52 – Características Geométricas da Seção SF148800 do Rio São Francisco . . . . .	259
Tabela 53 – Características Geométricas da Seção SF144800 do Rio São Francisco . . . . .	260
Tabela 54 – Características Geométricas da Seção SF142200 do Rio São Francisco . . . . .	261
Tabela 55 – Características Geométricas da Seção SF137600 do Rio São Francisco . . . . .	262
Tabela 56 – Características Geométricas da Seção SF134000 do Rio São Francisco . . . . .	263
Tabela 57 – Características Geométricas da Seção SF130300 do Rio São Francisco . . . . .	264
Tabela 58 – Características Geométricas da Seção SF127210 do Rio São Francisco - Parte I	265

Tabela 59 – Características Geométricas da Seção SF127210 do Rio São Francisco - Parte II	266
Tabela 60 – Características Geométricas da Seção SF127190 do Rio São Francisco - Parte I	267
Tabela 61 – Características Geométricas da Seção SF127190 do Rio São Francisco - Parte II	268
Tabela 62 – Características Geométricas da Seção SF122100 do Rio São Francisco . . . . .	269
Tabela 63 – Características Geométricas da Seção SF118800 do Rio São Francisco . . . . .	270
Tabela 64 – Características Geométricas da Seção SF116400 do Rio São Francisco . . . . .	271
Tabela 65 – Características Geométricas da Seção SF111700 do Rio São Francisco . . . . .	272
Tabela 66 – Características Geométricas da Seção SF109400 do Rio São Francisco . . . . .	273
Tabela 67 – Características Geométricas da Seção SF102500 do Rio São Francisco . . . . .	274
Tabela 68 – Características Geométricas da Seção SF95600 do Rio São Francisco . . . . .	275
Tabela 69 – Características Geométricas da Seção SF92600 do Rio São Francisco . . . . .	276
Tabela 70 – Características Geométricas da Seção SF86600 do Rio São Francisco . . . . .	277
Tabela 71 – Características Geométricas da Seção SF83200 do Rio São Francisco . . . . .	278
Tabela 72 – Características Geométricas da Seção SF77200 do Rio São Francisco . . . . .	279
Tabela 73 – Características Geométricas da Seção SF71100 do Rio São Francisco . . . . .	280
Tabela 74 – Características Geométricas da Seção SF68200 do Rio São Francisco . . . . .	281
Tabela 75 – Características Geométricas da Seção SF63800 do Rio São Francisco . . . . .	282
Tabela 76 – Características Geométricas da Seção SF57000 do Rio São Francisco . . . . .	283
Tabela 77 – Características Geométricas da Seção SF53400 do Rio São Francisco . . . . .	284
Tabela 78 – Características Geométricas da Seção SF44700 do Rio São Francisco . . . . .	285
Tabela 79 – Características Geométricas da Seção SF38800 do Rio São Francisco - Parte I	286
Tabela 80 – Características Geométricas da Seção SF38800 do Rio São Francisco - Parte II	287
Tabela 81 – Características Geométricas da Seção SF35400 do Rio São Francisco - Parte I	288
Tabela 82 – Características Geométricas da Seção SF35400 do Rio São Francisco - Parte II	289
Tabela 83 – Características Geométricas da Seção SF32000 do Rio São Francisco - Parte I	290
Tabela 84 – Características Geométricas da Seção SF32000 do Rio São Francisco - Parte II	291
Tabela 85 – Características Geométricas da Seção SF30700 do Rio São Francisco . . . . .	292
Tabela 86 – Características Geométricas da Seção SF29000 do Rio São Francisco - Parte I	293
Tabela 87 – Características Geométricas da Seção SF29000 do Rio São Francisco - Parte II	294
Tabela 88 – Parâmetros Fixos de Albedo para o MGB-IPH . . . . .	295
Tabela 89 – Parâmetros Fixos de Índice de Área Foliar (IAF) para o MGB-IPH . . . . .	296
Tabela 90 – Parâmetros Fixos de Altura do Dossel (Z) para o MGB-IPH . . . . .	296
Tabela 91 – Parâmetros Fixos de Resistência Superficial (RS) para o MGB-IPH . . . . .	297
Tabela 92 – Parâmetros Calibráveis para o MGB: CI, CS, CB e QB . . . . .	297
Tabela 93 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para as Bacia 1, 2, 3 e 4 . . . . .	298
Tabela 94 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para a Bacia 5, 6, 7 e 8 . . . . .	299

Tabela 95 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para a Bacia 9, 10, 11, 12 . . . . .	300
Tabela 96 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para a Bacia 13	301
Tabela 97 – Configuração Geométrica de nós para o SOBEK - Rio Abaetés . . . . .	303
Tabela 98 – Configuração Geométrica de nós para o SOBEK - Rio São Francisco 1 . . . .	303
Tabela 99 – Configuração Geométrica de nós para o SOBEK - Rio São Francisco 2 . . . .	304
Tabela 100–SPRNT: Configuração completa do rio Abaetés . . . . .	305
Tabela 101–SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 1 . . . . .	305
Tabela 102–SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 2 . . . . .	306
Tabela 103–SPRNT: Configuração reduzida do rio Abaetés . . . . .	306
Tabela 104–SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 1 . . . . .	306
Tabela 105–SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 2 . . . . .	307
Tabela 106–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção PBR040 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km) . . . . .	309
Tabela 107–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção TMarias - Onda Difusiva Grosseira (DW30km) . . . . .	310
Tabela 108–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km) . . . . .	311
Tabela 109–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km) . . . . .	312
Tabela 110–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km) . . . . .	313
Tabela 111–Valores de Cota e Largura da Seção para a Seção Pirapora - Onda Difusiva Grosseira (DW30km) . . . . .	314
Tabela 112–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção PBR040 - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	315
Tabela 113–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção Três Marias - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	316
Tabela 114–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01a - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	317
Tabela 115–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01b - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	318
Tabela 116–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01 - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	319
Tabela 117–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02a - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	320
Tabela 118–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02b - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	321

Tabela 119–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02 - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	322
Tabela 120–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03a - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	323
Tabela 121–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03b - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	324
Tabela 122–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03 - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	325
Tabela 123–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N Pa - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	326
Tabela 124–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N Pb - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	327
Tabela 125–Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção Pirapora- ponte - Onda Difusiva Refinada (DW10km) . . . . .	328
Tabela 126–Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio Abaetés (PBR040) - Cascata de Reservatórios (RR) . . . . .	329
Tabela 127–Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio São Francisco (N01a) - Cascata de Reservatórios (RR) . . . . .	330
Tabela 128–Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio São Francisco (N02) - Cascata de Reservatórios (RR) . . . . .	331
Tabela 129–Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio São Francisco (N03) - Cascata de Reservatórios (RR) . . . . .	332
Tabela 130–Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para até Pirapora - Cascata de Reservatórios (RR) . . . . .	333
Tabela 131–Desempenho estatístico e computacional dos modelos no Ponto Pirapora para os modelos hidrodinâmicos utilizados: SOBEK, MGB, R.R. e D.W. . . . .	335





# Lista de abreviaturas e siglas

ADCIRC	<i>ADvanced CIRculation</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
API	Application Programming Interface
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CPU	Central Processing Unit
CVSF	Comissão do Vale do São Francisco
Delft-FEWS	Delft-Flood Early Warning System
DW	Diffusive Wave
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecast
EFFS	European Flood Forecast System
EM	<i>Ensemble Médio</i>
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
EPS	European Prediction Centre
ESV	Equações de Saint-Venant
FB	Feedback Control
FF	Feedforward Control
FLOPs	Floating-point Operations per Second
GCM	General Circulation Model
GMT	Greenwich Mean Time
HBV	Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning

HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
HRU	Hydrology Responses Units ou Unidades de Resposta Hidrológicas
IBM	International Business Machines
IoT	Internet of Things
IPOPT	Interior Point Optimizer
MC	Muskingum-Cunge
MGB	Modelos de Grandes Bacias
MLT	Vazao Media de Longo Prazo
MME	Ministério de Minas e Energias
MPC	Model Predictive Control
NEWAVE	Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo
NFFS	UK National Flood Forecasting System
NLMC	Non-Linear Muskingum-Cunge
NLMPC	Non-Linear Model Predictive Control
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
NWP	Numerical Weather Prediction
NWS	National Weather Service
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCC	Período de Controle de Cheias
PID Controller	Proportional-Integral-Derivative Controller
PNRH	Política Nacional dos Recursos Hídricos
QPF	Quantitative Precipitation Forecasts
RAM	Rapid Access Memory

RIZA	Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling
RMSE	Root Main Square Error
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RR	Reservoir Routing
RTC-Tools	Real Time Control - Tools
SABESP	Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo
SAC-SMA	Sacramento Soil Moisture Accounting Model
SCS-CN	Soil Conservation Service - Curve Number
SCS-UH	Soil Conservation Service - Unit Hydrograph
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPRNT	Simulation Program for River Networks
SSD	Sistemas de Suporte à Decisão
SWFDP	Severe Weather Forecasting Demonstration Project
TCO	Teoria do Controle Ótimo
THORPEX	The Observing System Research and Precicability Experiment
TIGGE	Interactive Grand Global Ensemble
UHE	Usina Hidroelétrica
USACE	US Army Corps of Engineers
VLSI	Very Large System Integration
WCD	World Comission of Dams
WMO	World Meteorological Organization
XML	eXtensive Markup Language



# Sumário

<b>I</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>31</b>
<b>1</b>	<b>O DESAFIO DO GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS</b>	<b>33</b>
1.1	Recursos Hídricos & Desenvolvimento	33
1.2	Impactos dos Eventos de Cheia e de Seca	36
1.3	Operação de Barragens e Reservatórios para Gerenciamento de Recursos Hídricos	39
<b>II</b>	<b>HIPÓTESE &amp; OBJETIVOS</b>	<b>43</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>45</b>
2.1	Hipótese	47
2.2	Objetivos	48
2.2.1	Objetivos Específicos	49
<b>III</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>51</b>
<b>3</b>	<b>REPRESAS, RESERVATÓRIOS E USINAS HIDRELÉTRICAS</b>	<b>53</b>
3.1	Usinas Hidroelétricas e Reservatórios	53
3.2	Usos Múltiplos	56
3.3	Setor Hidroenergético Brasileiro	57
3.4	Expansão Planejada do Setor Hidrelétrico	59
3.5	Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL	60
3.6	Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS	61
3.6.1	Sistema Interligado Nacional - SIN	61
3.6.2	Políticas e Regras de Operação da ONS	62
3.7	<b>NEWAVE - Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo</b>	<b>62</b>
3.7.1	Diretrizes e Regras de Operação de Controle de Cheia	65
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DE BACIA HIDROGRÁFICAS</b>	<b>67</b>
4.1	Modelos Hidrológicos	70
4.2	Modelos Hidráulicos	72
4.3	Sistemas de Suporte à Decisão (SSD)	76
4.3.1	Sistemas de Previsão de Cheia e de Alerta	79

<b>5</b>	<b>ESCOAMENTO HIDRÁULICO EM CANAIS . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>5.1</b>	<b>Equações de Saint-Venant . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>5.2</b>	<b>Comparação entre abordagem Implícita Explícita . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>5.3</b>	<b>Dedução das Equações 1D de Saint-Venant . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>5.4</b>	<b>Simplificações das Equações de Saint-Venant . . . . .</b>	<b>98</b>
<b>6</b>	<b>MODELO DE CONTROLE PREDITIVO - MPC . . . . .</b>	<b>101</b>
<b>6.1</b>	<b>Diferenças entre MPC sequencial e simultâneo . . . . .</b>	<b>106</b>
6.1.1	MPC Simultâneo . . . . .	107
6.1.2	MPC Sequencial . . . . .	108
<b>6.2</b>	<b>Aplicação na Operação de Reservatórios . . . . .</b>	<b>109</b>
<b>6.3</b>	<b>Modelo Adjunto - Otimizador . . . . .</b>	<b>112</b>
<b>6.4</b>	<b>IPOPT - Interior Point Optimizer . . . . .</b>	<b>113</b>
<b>7</b>	<b><i>NUMERICAL WEATHER PREDICTION</i> . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>7.1</b>	<b>Previsão Estocástica x Previsão Determinística . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>7.2</b>	<b>Ensembles . . . . .</b>	<b>117</b>
7.2.1	Dispersão do <i>Ensemble</i> . . . . .	121
7.2.2	Diagrama de Previsões em Árvore . . . . .	122
7.2.3	Técnicas de Assimilação de Dados e Fontes de Incertezas . . . . .	124
<b>IV</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>129</b>
<b>8</b>	<b>MODELOS HIDRÁULICOS E HIDROLÓGICOS UTILIZADOS . . .</b>	<b>131</b>
<b>8.1</b>	<b>RTC-Tools . . . . .</b>	<b>132</b>
<b>8.2</b>	<b>Cascata de Reservatórios - <i>Reservoir Routing</i> . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>8.3</b>	<b>SOBEK . . . . .</b>	<b>135</b>
<b>8.4</b>	<b>MGB-IPH . . . . .</b>	<b>142</b>
8.4.1	Muskingum-Kunge . . . . .	143
<b>8.5</b>	<b>SPRNT . . . . .</b>	<b>143</b>
<b>9</b>	<b>DELFT-FEWS . . . . .</b>	<b>145</b>
<b>9.1</b>	<b>Estrutura do Delft-FEWS . . . . .</b>	<b>151</b>
9.1.1	Importação, armazenamento, processamento e manipulação dos dados . . .	152
9.1.2	Integração de Modelos . . . . .	154
<b>10</b>	<b>ESTUDO DE CASO: BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO SÃO FRAN-</b>	
	<b>CISCO . . . . .</b>	<b>157</b>
<b>10.1</b>	<b>UHE-Três Marias . . . . .</b>	<b>158</b>
10.1.1	Caracterização da Situação de Operação de Três Marias . . . . .	160

<b>10.2</b>	<b>Modelo Conceitual do Problema</b>	<b>162</b>
10.2.1	Integração de Modelos e Banco de Dados	164
<b>10.3</b>	<b>Configuração e Calibração dos Modelos</b>	<b>165</b>
10.3.1	Configuração do MGB	168
10.3.2	SOBEK	171
10.3.3	SPRNT	174
10.3.4	RTC-Tools	175
<b>10.4</b>	<b>Configuração do IPOPT</b>	<b>181</b>
<b>10.5</b>	<b>Modelos Internos</b>	<b>181</b>
<b>11</b>	<b>INDICADORES DE DESEMPENHO</b>	<b>183</b>
<b>V</b>	<b>RESULTADOS &amp; DISCUSSÃO</b>	<b>187</b>
<b>12</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>189</b>
12.1	SOBEK x SPRNT	190
12.2	Impacto da Resolução Espacial	191
12.3	Impacto da Resolução Temporal	191
12.4	SOBEK X MGB-IPH X RTC-Tools	194
12.5	Métricas de Desempenho	195
12.6	Avaliação de Performance Computacional dos Modelos	197
12.7	Resultados da Simulação do Otimizador	200
12.7.1	Cenário 1: Condição Normal	201
12.7.2	Cenário 2: Condição de Estiagem	202
12.8	Avaliação dos Resultados dos Cenário de Otimização	205
<b>13</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>211</b>
13.1	<i>Trade-off</i> entre Precisão e Desempenho Computacional	214
13.2	Sugestões para futuras pesquisas	218
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>221</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>237</b>
	<b>ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DE SITUAÇÃO PARA OPERAÇÃO - ONS</b>	<b>239</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>243</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS BATIMÉTRICOS DO RIO SÃO FRANCISCO E DO RIO ABAETÉS . . . . .</b>	<b>245</b>
<b>APÊNDICE B – PARÂMETROS CALIBRADOS PARA O MGB-IPH295</b>	
<b>APÊNDICE C – GEOMETRIA DOS CANAIS DA CONFIGURAÇÃO DO SOBEK . . . . .</b>	<b>303</b>
<b>APÊNDICE D – GEOMETRIA DOS CANAIS DA CONFIGURAÇÃO DO SPRNT . . . . .</b>	<b>305</b>
<b>APÊNDICE E – RTC-TOOLS - GEOMETRIA PARA ONDA DIFUSIVA DE MALHA GROSSEIRA DO RTC-TOOLS</b>	<b>309</b>
<b>APÊNDICE F – RTC-TOOLS - GEOMETRIA PARA ONDA DIFUSIVA MALHA REFINADA DO RTC-TOOLS .</b>	<b>315</b>
<b>APÊNDICE G – RTC-TOOLS - GEOMETRIA PARA CASACADA DE RESERVATÓRIOS DO RTC-TOOLS . . . . .</b>	<b>329</b>
<b>APÊNDICE H – SUMÁRIO DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>335</b>



Parte I

Introdução



# 1 O Desafio do Gerenciamento de Recursos Hídricos

Neste capítulo introdutório pretende-se apresentar alguns conceitos básicos para o entendimento do problema a ser abordado nesta tese. Será debatida a importância dos recursos hídricos que é vital para o desenvolvimento humano, sendo esta relação pode ser traçada historicamente desde as primeiras sociedades organizadas até os dias de hoje.

Estes recursos trazem progresso, mas também podem infligir grandes prejuízos se houver falta de conhecimento sobre o comportamento deles e caso não existir um planejamento adequado para lidar com a variação deste recurso temporalmente, espacialmente, quantitativamente e qualitativamente. Ou seja, a disponibilidade da água depende da época do ano sendo mais abundante em épocas chuvosas e mais escassa em épocas de seca; da região, pois existem locais que sofrem de escassez e outros que possuem abundância; e de características quali-quantitativas, uma vez que o recurso pode existir no local e no momento, mas não na quantidade ou mesmo na qualidade desejada.

Os reservatórios e hidroelétricas podem, no entanto, servir como ferramentas para mitigar alguns dos impactos causados por esta variação da disponibilidade hídrica. Porém a operação de reservatórios para gerenciamento de recursos hídricos não é tarefa simples; o equacionamento deste problema envolve muitas variáveis e também diversos atores, o que torna a solução e otimização deste problema muito complexo,

Os recursos computacionais foram desenvolvidos e são muito eficientes em solucionar o equacionamento de sistemas complexos, portanto são usadas como uma ferramenta para solução deste problema extremamente complexo. Assim quando utilizadas em conjunto com o conhecimento prévio, experiência e bom senso dos tomadores de decisão e operadores do sistema, são peças vitais no gerenciamento integrado de recursos hídricos.

## 1.1 Recursos Hídricos & Desenvolvimento

Historicamente o desenvolvimento humano sempre esteve relacionado com os recursos hídricos, ou seja, a disponibilidade hídrica, tanto quantitativamente quanto qualitativamente, determina o sucesso ou fracasso da população no local. Segundo Sivapalan, Savenije e Blöschl (2012), a água tem uma importância e impacto no crescimento, evolução e colapso final de muitas sociedades no passado.

As grandes civilizações da antiguidade conseguiram estabelecer numerosos povoados e cidades às margens de grandes rios; podendo citar entre eles o Tigre e o Eufrates na Mesopotâmia, Rio Nilo no Antigo Egito, Rio Indo na Índia e Rio Amarelo na China. Além do abastecimento de água para a população, estes rios desempenhavam funções importantes em suas sociedades como transporte, pesca irrigação e fertilização de campos férteis para colheitas. Em contrapartida raramente povoada humana floresceram em locais onde não havia tais recursos.

Assim sendo, o gerenciamento eficiente é de suma importância para garantir que não haja falta deste recurso. Em um estudo sobre a resiliência hídrica do Império Romano, Dermody et al. (2014) mostraram que eles possuíam uma intrincada e complicada rede de importação de água virtual (água necessária nos processos de produção de um bem, produto ou serviço), que permitia a prosperidade do império em resposta à urbanização e variabilidade climática de seus territórios, em outras palavras, embora não houvesse quantidade de água disponível na capital, os territórios administrados pelo império seriam capazes de abastecer os territórios deficitários de água.

Segundo Barker (1996), os romanos não foram a primeira civilização a utilizar-se de técnicas de gerenciamento hídrico, mas o grau de organização e sofisticação foi sem precedentes, o que permitiu um alto rendimento nas colheitas no império. Eles se utilizavam de diversas ferramentas para gerir o suprimento de água, eles dominavam tecnologias como barragens, aquedutos, canais, cisternas, rodas de água e *qanats* (Galerias de águas subterrâneas) (BARKER, 1996; WILSON, 1997).

O gerenciamento dos recursos hídricos era tão importante no Império Romano, que existiam impostos para a construção, operação e manutenção desta infraestrutura usada no gerenciamento hídrico, nas regiões do Egito, a extensão de terra irrigada era taxada e na Espanha, Sicília e Sardenha, havia impostos sobre a colheita (LLORIS, 2006; ERDKAMP, 2005). Em Lloris (2006), Butzer et al. (1985), Leeuw (1998) os autores afirmam que este complexo gerenciamento permitiu que a água superficial se tornasse um recurso confiável, sem a dependência sazonal e imprevisível de águas proveniente de precipitações.

Há uma importância e correlação entre a disponibilidade deste recursos e desenvolvimento, já que é virtualmente impossível desenvolver atividades humanas sem eles; Em um trabalho de Libânio, Chenicharo e Nascimento (2005), os autores compararam indicadores de disponibilidade hídrica e de saneamento com os indicadores de saúde e desenvolvimento social de municípios brasileiro, obtendo uma correlação entre eles, destacando a importância dos indicadores de saneamento básico como cobertura de serviços de água e esgoto e indicadores de disponibilidade hídrica e de sua qualidade.

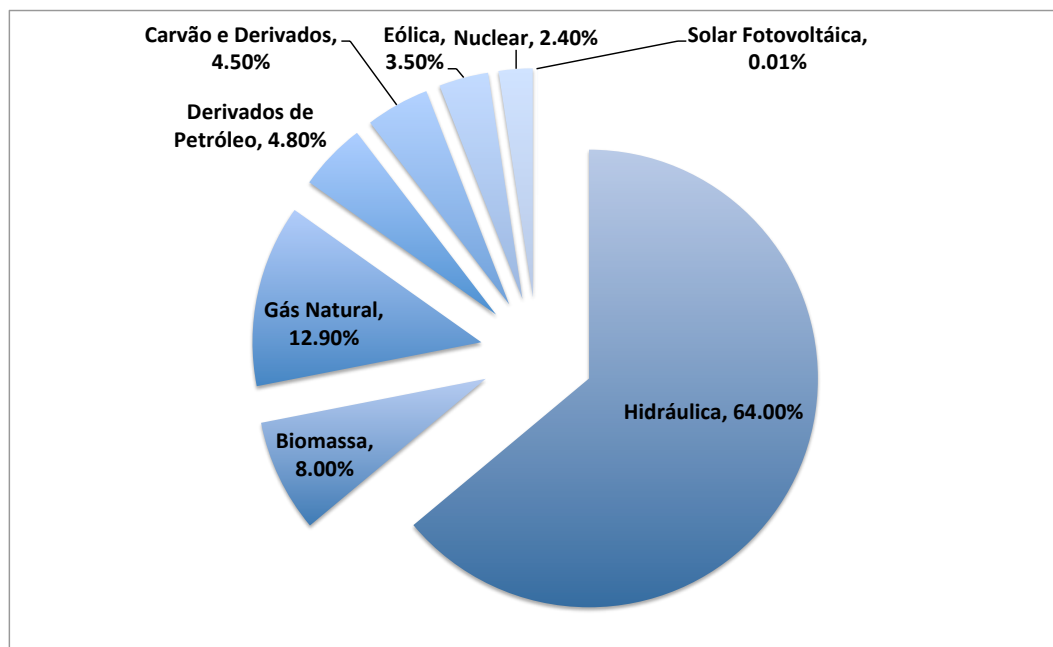
É portanto vital que se utilize estes recursos de forma racional evitando que haja escassez

ou mesmo degradação da qualidade de deles, o que reduzem as atividades que podem utiliza-los sem custos e processos de tratamento. Neste âmbito o gerenciamento de recursos hídricos se desenvolve ao passo que estes conflitos se tornam mais evidentes.

Em Biswas (2008) os autores relatam que o gerenciamento integrado dos recursos hídricos começou a ser desenvolvido durante o fim da década de 40 e início dos anos 50, e que motivado pelos problemas ambientais teve um progresso intensificado durante os anos 80 e 90. No entanto os autores ressaltam que ainda é necessário substanciais progressos para que haja maior governança sobre estes recursos.

## Importância dos Recursos Hídricos no Brasil

Atualmente no Brasil existe uma grande preocupação com o gerenciamento dos recursos hídricos visto que a geração elétrica do país é dependente de geração hidroelétrica, atualmente ela corresponde por 64,0% de toda energia elétrica produzida no país (Figura 1). Os valores desta porcentagem flutuam de ano a ano devido a sazonalidade pluviométrica, períodos recessão econômica e mudanças no perfil de consumo da população. Esta modalidade representava em 2011 por 67% ou 77.001MW da capacidade total instalada para geração elétrica no país de 115.162 MW.



Adaptado de Empresa de Pesquisas Energéticas e Ministério de Minas e Energias (2016)

Figura 1 – Matriz Elétrica Brasileira em 2015.

Esta dependência de recursos hídricos para geração hidrelétrica torna o Brasil também vulnerável à eventuais crises de abastecimento elétrico em períodos de seca anormal, como

os registrados entre 2001 e 2002, na chamada "*crise do apagão*", onde houve racionamento de energia e que motivou uma reestruturação do setor energético e a criação de uma agência nacional para o gerenciamento de recursos hídricos (ESTIGONI et al., 2011).

O desenvolvimento continua vinculado com a disponibilidade de água, visto que os recursos hídricos continuam a desempenhar papel essencial nas atividades humanas. Uma vez que os corpos de água ainda são utilizados para abastecimento hídrico, geração de energia, saneamento, transporte fluvial, pesca, irrigação, dessedentação animal, usos recreativos e paisagísticos.

## 1.2 Impactos dos Eventos de Cheia e de Seca

A conforme visto na seção 1.1 o desenvolvimento humano está intrinsecamente dependente e vulnerável à disponibilidade destes recursos, portanto a variabilidade temporal, espacial, quantitativa e qualitativa impacta diretamente o desenvolvimento dela. Eventos climáticos extremos, onde há escassez ou excesso deste recurso, podem resultar em impactos negativos podendo até resultar em danos e consequências irreversíveis tanto para o meio-ambiente quanto para a população.

### Eventos de Seca

Os eventos de seca, geralmente são ocasionados por períodos longos de baixa pluviosidade que acarretam em estresse hídrico, ou seja, falta de água disponível. Além-claro de problemas para o abastecimento, a falta de água pode impactar economicamente e financeiramente, uma vez que as atividades agrícolas e pecuárias são completamente comprometidas, podendo em casos extremos causar fome e instabilidade sócio-política. Em países que dependem da energia hidroelétrica, isto pode também acarretar em desabastecimento elétrico.

Em Landon-Lane, Rockoff e H.Steckel (2009) é mostrado que os eventos de seca registrados no estado do Kansas, estão correlacionados com períodos de recessão econômica. O exemplo clássico é o chamado "*The Dusty Bowl*", que foi um evento de estiagem ocorrido nos EUA durante os anos 1930; foi mais crítico nos estados de Oklahoma, Texas e Novo México entre 1930 até 1936, este evento crítico é creditado como um dos deflagradores da Grande Depressão ou Crise de 29; causando prejuízos na agricultura avaliados em US\$ 153 Milhões em 1930 (corrigidos para US\$ 1,9 bilhões em 2007) além de declínio e deslocamento populacional.(HORNBECK, 2009; MURPHY, 1935).

No Brasil recentemente houve alguns eventos crítica os de seca documentados: 2005 na região amazônica, que passou pelo evento mais severo dos últimos 100 anos resultando em suspensão da navegação de trechos do rio Madeira e do Amazonas (MARENGO et al., 2008). Em 2012, eventos de grande magnitude foram registrados na região sul do país e entre 2011

e a região nordeste foi afetada em 2013. Mais recentemente foi a vez da região Sudeste ser afetada por um evento deste tipo. Segundo Marengo et al. (2015) entre 2014 e 2015 um bloqueio atmosférico da Zona de Convergência do Atlântico Sul por 45 dias na época chuvosa resultou em um período de baixos índices pluviométricos. Este período de estiagem combinado com uma crescente demanda hídrica e um gerenciamento ineficiente dos recursos hídricos gerou a maior crise hídrica dos últimos 60 anos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Esta seca causou casos de desabastecimento de água e racionamento durante o período mais crítico do evento, sendo que algumas regiões dependeram de caminhões-pipa para o abastecimento e a concessionária estatal SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), teve de reduzir a pressão da rede, reduziu a extração em um terço e ofereceu descontos para clientes que apresentassem redução de consumo. Outros impactos diretos deste evento foram aumento das tarifas de energia elétrica e aumento de preços de produtos MARENGO et al., op. cit..

## Eventos de Inundação

Knight e Shamseldin (2005) categoriza as causas de cheias e enchentes em duas categorias:

### 1. Causas Naturais:

- a) Precipitação (chuva, granizo & degelo);
- b) Deslizamentos de terra (instabilidades de taludes, erosão, atividades sísmicas);
- c) Tempestades (Zonas de baixa pressão elevando marés);
- d) Elevação dos nível de água subterrânea;
- e) Derretimento de geleiras ou colapso (devido à atividade vulcânica);
- f) Mudança Climática (alterações nos padrões de precipitação e dos níveis do mar);

### 2. Causadas por atividade antrópicas:

- a) Rompimento de Barragens (catastrófico, galgamento, etc.);
- b) Falha de Obras de Terraplanagem (Aterros de proteção contra enchentes de rio e costais);
- c) Invasão das várzeas (Urbanização das planícies de inundação de rios, perda de volume de armazenamento dos rios);
- d) Alteração do Uso e Ocupação do Terreno (Mudanças do tipo de culturas, compactação do solo, desflorestação, etc.);

- e) Controles de Planejamento Inadequados para a Área da Bacia hidrográfica (âmbitos Local e Nacional);
- f) Capacidade de Drenagem Inadequada (Urbanização) e Assoreamento (Processos Naturais);
- g) Integração Inadequada (ex: entre rio e sistemas de rede de esgoto/drenagem subterrânea);
- h) Manutenção Inadequada ( Nos canais dos cursos de água urbanos e entupimento e bloqueio dos sistemas de canais de esgotos);

Muito embora as cheias tragam impactos positivos no meio-ambiente com fertilização das margens de inundação, recarga de lençóis freáticos além de terem um papel importante para os ecossistemas, estes eventos podem ameaçar a vida, saúde, manutenção e sustento do modo de vida e causar danos materiais. Segundo World Commission on Dams (2000) e (GREEN; PARKER; TUNSTALL, 2000) entre 1972 e 1996 aproximadamente 65 milhões de pessoas tiveram suas vidas afetadas por estes eventos.

Knight e Shamseldin (2005) um estudo dos eventos naturais catastróficos do mundo inteiro entre 1988 e 1997, indicam que as inundações representam um terço desses eventos, são responsáveis por metade das vítimas fatais e um terço do prejuízo financeiro. As inundações são também particularmente mais letais quando ocorrem em países com perfil populacional pobre e populoso. Na Tabela 1 lista alguns dos maiores eventos de cheia que ocorreram nos Países Baixos, China, EUA, Reino Unido, Bangladesh, Índia e Filipinas.

No âmbito nacional na última década houve eventos severos de enchente, os quais resultaram em perdas de vidas, evacuação de população e danos materiais. Em 2008, 77 municípios do vale do Itajaí na região sul do país foram atingidos por um evento que se estima ter afetado mais de 1,5 milhões de pessoas: 78.656 pessoas tiveram de ser evacuadas e 135 óbitos confirmados em decorrência destes eventos. Somente na cidade de Blumenau, os custos para reconstrução estavam estimados em 193,8 milhões de reais (AACI/FURB, 2009). Em 2011, outro evento desta magnitude atingiu a região serrana do estado de Rio de Janeiro, nos 15 municípios afetados foram contabilizados 910 óbitos, 662 pessoas desaparecidas e 36.083 pessoas evacuadas. O prejuízo do setor agrícola foi de 269 milhões de reais por causa dos danos causados pela enchente.

MARENCO et al., op. cit. As grandes precipitações no sul do Brasil, em 2015, já causaram prejuízos materiais da ordem de R\$ 500 milhões em 52 cidades do estado do Rio Grande do Sul.



Tabela 1 – Grandes Eventos de Inundação registrados na Europa, Ásia e América do Norte

Ano	Local	Vítimas Fatais
1421	Países Baixos	100.000
1530	Países Baixos	400.000
1642	China	300.000
1887	Rio Amarelo, China	900.000
1900	Galveston, Texas, EUA	5.000
1911	Rio Yangtze, China	100.000
1931	Rio Yangtze, China	145.000
1935	Rio Yangtze, China	142.000
1938	Rio Amarelo, China	870.000
1949	Rio Yangtze, China	5.700
1953	Países Baixos	1.835
1953	Reino Unido	356
1954	Rio Yangtze, China	30.000
1960	Bangladesh	10.000
1963	Vaiont, Itália	1.800
1979	Morvi, Índia	15.000
1991	Bangladesh	139.000
1991	Filipinas	6.000
1991	Rio Huai, China	2.900
1998	Rio Yangtze, China	1.320

Fonte: Adaptado de Knight e Shamseldin (2005)

### 1.3 Operação de Barragens e Reservatórios para Gerenciamento de Recursos Hídricos

Os reservatórios artificiais das barragens e represas podem ser usados como bacias de retenção utilizando-se de sua capacidade de armazenamento para reduzir os picos da propagação de ondas de cheia em regiões à jusante e com isso reduzir o perigo e risco destes eventos (GREEN; PARKER; TUNSTALL, 2000). Portanto estas estruturas que originalmente foram criadas para atender as necessidades de atividades humanas como: irrigação, abastecimento de água, navegação, produção de peixes, recreação e produção hidrelétrica; surge como um importante ator na estratégia de mitigação de impactos ambientais ocasionados pelos eventos de cheia e secas. Para operar estas estruturas de maneira mais eficientemente possível, ações não estruturais podem contribuir significativamente. Estas ações incluem monitoramento hidrológico (pluviosidade, fluvial e nível de barragens), além disto, previsão hidrológica, sistemas de alerta rápidos e implementação *offline* e *online* de estratégias de operação.

Todo o gerenciamento de reservatórios é feito a partir destes dados de volume, que geralmente são expressos por uma curva que relaciona a cota da lâmina da água e sua respectiva

área superficial com o volume respectivo a estes dados. Sendo assim, com uma simples leitura de régua, se verifica o volume do que o reservatório possui no exato momento. Fornecendo subsídio para se determinar vazões a serem utilizadas em seus diversos usos, a abertura de vertedores, etc.

As estratégias de gerenciamento de volume também tem um papel essencial, porque como já dito antes, além das funções de abastecimento de água, os reservatórios são usados para diversos outros usos como a geração de energia. Uma vez que o volume de água e a capacidade de reserva disponível são limitados e a quantidade de água para dividir entre todas as atividades conflitantes está suscetível ao regime de chuvas local e ao porte dos corpos hídricos que alimentam as barragens, estes conflitos de interesses acerca das prioridades e volumes disponíveis para os diferentes usos demandam que exista um gerenciamento que permita atender quando e se possível estes diversos interesses e necessidades para os recursos hídricos se torna imprescindível.

Duren e Beard (1972) já estava preocupado em desenvolver metodologias para conseguir operar reservatórios de forma a atender as diferentes demandas de água, citando que já haviam pesquisas neste tópico nos EUA desde 1966. De forma bem generalista podemos definir que é desejável que em uma operação eficiente de reservatórios para evitar conflitos.

O gerenciamento otimizado amplia um pouco mais a forma de operação englobando não somente evitar conflitos, como guiar a operação para que não somente não haja falta de recurso como seja possível operar os reservatórios para que se utilize o máximo possível de volume de água. Para tanto deve-se armazenar o máximo de volume possível na época chuvosa, para criar reservas que serão deplecionadas na época seca. Isto é conveniente para o controle de cheias, já ao sair da época seca com volume de espera, é possível utiliza-lo para atenuar picos de cheias maiores.

HE et al. (2014) afirmam que atualmente grande parte destes processos de operação ainda dependem muito da experiência e julgamento do tomador de decisão em organizar a programação de vertimentos da barragem e que a solução do modelo de controle operacional de cheias de um reservatório por meio de métodos de otimização, levando em consideração a capacidade de reserva e vazões de entrada e de saída é geralmente complexo. Envolvendo um grande número de restrições como volume de espera disponível no reservatório, níveis dos rios à jusante, vazão de saída, e assim por diante.

Para resolver este tipo e dimensão de problema, devido sua complexidade, deve-se portanto utilizar técnicas computacionais e poder de processamento. Essas ferramentas computacionais fornecem recursos que somados com a experiência e conhecimento dos operadores servem de auxílio para utilização racional dos recursos. Nos últimos anos o poder de processamento, disponibilidade e custos de recursos computacionais evoluiu muito, sendo que atualmente,

são largamente disponíveis e utilizados para resolução de problemas na hidrologia.



## Parte II

### Hipótese & Objetivos



## 2 Justificativa

Conforme foi apresentado na seção 1.1, o desenvolvimento humano está intimamente relacionado com a disponibilidade de recursos hídricos, adicionado a isto na seção 1.2, foi apresentado a sensibilidade e vulnerabilidade da população a eventos extremos tanto de secas quanto de inundações. A história nacional e internacional mostra que estes eventos podem causar impactos negativos, que impactam o desenvolvimento de diversas maneiras e graus, resultando em perdas materiais, financeiras e mesmo causar vítimas fatais.

A mitigação dos efeitos e magnitude de eventos climáticos extremos, é apresentada na seção 1.3; podendo ser feita tanto através de ações físicas, quanto de ações não-físicas. As ações físicas consistem de construção de estruturas hidráulicas como represas, reservatórios, diques e piscinões; já as ações não físicas consistem de atividades como monitoramento hidrológico e meteorológico e do gerenciamento dos recursos hídricos.

Garantir água suficiente para as atividades humanas evitando conflitos não é uma tarefa trivial, pois existem diversas demandas hídricas que podem ser conflitantes entre si, como por exemplo, navegação e geração hidrelétrica ou mesmo abastecimento humano e irrigação. Além disto, temos que as estruturas hidráulicas, como açudes, reservatórios, estações elevatórias e usinas hidrelétricas, devem ser operadas e controladas de forma atender diferentes requisitos e/ou limitações operacionais como: como níveis de operação (máximos e mínimos), vazões operacionais (máximas e mínimas), limitações na taxa de variação, custo operacional, despachos de energia além de atentar para controle da carga do sistema.

O processamento computacional de dados e processos complexos surge como um importante recurso para os tomadores de decisão, servindo como uma ferramenta complementar à experiência e julgamento do operador (LABADIE; SULLIVAN, 1986). A modelagem hidráulica de canais abertos é extremamente complexa e depende fortemente de muita capacidade de processamento de dados, existem uma vasta gama de modelos estudados e disponíveis na literatura, alguns tipos de simulações podem ser extremamente detalhadas e complexas (SCHUURMANS, 1997; SCHUURMANS; BOSGRA; BROUWER, 1995; FORTUNA, 2012; FRANZ; MELCHING, 1997; LIU; HODGES, 2014).

Portanto urge a necessidade de testar diferentes modelos, integrar metodologias e processos de modelagem hidráulicos/hidrológicos a fim de criar de um banco de modelos mais aptos para as condições locais e necessidades do usuário final, bem como avaliar as limitações e restrições de aplicabilidade, obtenção de parâmetros e regionalização dos modelos testados (NASR et al., 2004; NÉELZ; G.PENDER, 2013; NOAA, 2007; BECK et al., 2016; CRISPINO; GISONNI;

IERVOLINO, 2014). Para sistemas de aviso rápido como os que são geralmente aplicados em problemas de controle de cheias e operação de vazão há necessidade de modelos hidráulicos rápidos, podendo avaliar mudanças súbitas de nível e vazão, bem como suas consequências à jusante do reservatório.

A aplicação de métodos de controle como o modelo de controle preditivo ou MPC (*Model Predictive Control*) para horizontes de previsão de curto prazo permite antever eventos meteorológicos críticos como estresse hídrico ou picos de vazão oferece uma pequena vantagem temporal, que permite aos tomadores de decisão agir antecipadamente, antevendo os impactos deste eventos e planejando ações mitigadoras que possibilitem a minimização dos impactos negativos. No caso de eventos de cheia, através destas técnicas, os operadores do conhecimento e análise do horizonte meteorológico futuro, podem esvaziar o reservatório previamente para alocar volume extra de reservação de forma permitir atenuação dos impactos de cheias a jusante.

Devido a imprevisibilidade meteorológica, para fins de operação de reservatórios otimizada é necessário que as simulações sejam constantemente revisadas e atualizadas, utilizando novos horizontes de previsão meteorológicas assim que estas forem criados e alimentando o sistema com novos estados e dados de entrada em tempo real. Assim novos cenários para operação ótima serão gerados e atualizados constantemente, conforme novos horizontes de previsão e novas condições futuras esperadas são fornecidas. Neste contexto é necessário um modelo de escoamento robusto e rápido, para obter estimativas do escoamento a jusante referente às mudanças de vertimento do reservatório.

O desenvolvimento de sistemas de previsão e alerta de enchentes é essencial tanto para o planejamento regional quanto para o nacional. Recentemente desenvolvimentos na previsão numérica climática, dados de radares meteorológicos e aquisição de dados hidrológicos e meteorológicos *on-line* resultaram em um crescente interesse em processamento de importação de dados.

No contexto do controle de cheias, a utilização de modelos hidrológicos em conjunto com o otimizador para apoiar a programação operacional, criando instruções que permitem que os operadores antevejam riscos de cheia e desta forma esvaziar o reservatório previamente para criar volume de espera antes que o evento de cheia aconteça. Isto evita que ocorram alguns problemas e violações de restrições operacionais que costumam ocorrer quando há falta de conhecimento dos horizontes futuros como esvaziar o reservatório muito rápido, criando impactos à jusante e liberação excessiva de volume para garantir que haja amortecimento dos efeitos dos picos de cheia.

Para a aplicação deste sistema de previsão e alerta de cheias, existem algumas premissas sendo estas que é necessário um modelo confiável, robusto e rápido para gerar estimativas



confiáveis em tempo real e continuamente da vazão defluente da barragem, bem como dos efeitos decorrentes das mudanças causadas pelo vertimento dos volumes do reservatório no ponto de controle de cheia a jusante. Desta forma surgem os seguintes questionamentos:

- a) Existem diversos modelos que são largamente utilizados na literatura nacional e internacional, mas, no entanto, seriam todos os modelos adequados para serem utilizados para Otimização de Operação de Reservatórios?
- b) Qual seriam os impactos negativos ou positivos de perdas significativas de fidelidade dos resultados no caso de se realizar simplificações para diminuir o tempo e esforço de processamento de dados destes modelos?

## 2.1 Hipótese

No âmbito de otimizações da operação de reservatórios para controle de cheias com horizonte de previsão curta, a velocidade com que se consegue obter resultados pode ser tão crítica quanto à precisão dos dados. Além da complexidade existente no atendimento de múltiplas demandas e simulação hidráulico-hidrológica, alguns picos de cheia podem ocorrer rapidamente, portanto a eficiência em se gerar resultados implica em uma vantagem temporal para o operador adotar as medidas necessárias para conter os efeitos negativos da propagação da onda de cheia a jusante da barragem.

Existem duas formas de contornar o problema da velocidade das simulações, ou seja, da rapidez em gerar resultados; a primeira seria aumentar a capacidade computacional com utilização de supercomputadores, que implica em aumentos de custos e investimentos vultosos em infraestrutura; a segunda maneira seria de adotar simplificações nos modelos e configurações usados nas simulações, de maneira tal que não haja comprometimento significativo na precisão e o desempenho dos resultados.

Acredita-se o modelo mais complexo e completo nem sempre deverá ser necessariamente o modelo mais adequado para solucionar o complexo problema de controle de cheias em tempo real, e que simplificar as equações governantes poderá gerar ganhos significativos nos tempos necessários para realizar a simulação sem comprometer a precisão dos resultados gerados. Existem diversas versões equações de Saint-Venant disponíveis na literatura que podem ser utilizadas neste tipo de problema, além disto pode-se configurar estas diferentes versões com diferentes graus de detalhamento.

Por outro lado, ao utilizar diferentes modelos ou mesmo diferentes configurações separadamente pode ser uma tarefa dispendiosa, impraticável e muitas vezes ineficaz; há necessidade de criar diversos documentos de entrada de dados, realizar diversas conversões para diferentes os

formatos das mesmas informações do banco de dados e comunicação entre estes modelos pode ser limitada caso não haja interoperabilidade ou aceitação de diversos formatos de arquivo.

Entende-se entanto que adotar uma plataforma que permita integração de diferentes modelos através de um gerenciamento eficiente dos bancos de dados, permite que se explore as potencialidades de diversos modelos criando um sistema de suporte à decisão (SSD) confeccionado e personalizado para as condições desejadas. Estas ferramentas também permitem empregar técnicas de aquisição de dados em tempo real, que são importantes em vista atualização e correção de dados visando geração de dados de forma contínua e rápida.

A presente pesquisa propõe abordar o pontos acima descritos através da criação da base de SSD desenvolvido para aplicações que envolvam operação e otimização de reservatórios para controle de cheias em tempo real. Para tanto foram testados diferentes modelos para verificar o desempenho computacional (velocidade de simulação) e estatístico (precisão das simulações) de seus resultados, os modelos foram integrados para permitir utilização de um banco de dados unificada e sempre que necessária utilização dos resultados como entrada de dados para melhorar as simulações, além de permitir fácil visualização e divulgação dos resultados. Por fim o modelo que apresentou melhores índices foi acoplado junto a um otimizador os quais foram testados fins do problema de controle de cheias com horizonte de previsão curta e em tempo real.

## 2.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo reportar novas informações sobre o desempenho computacional das simplificações das Equações de Saint-Venant (ESV) na operação de reservatórios para controle de cheias: Existem disponíveis na literatura científica muitos de modelos hidráulicos desenvolvidos e em desenvolvimento, no entanto existem poucos trabalhos que investigam a eficiência computacional deles em relação sua aplicabilidade em operação de reservatórios para controle de eventos extremos.

Na modelagem computacional de canais abertos utiliza-se geralmente a forma unidimensional das ESV, que requerem muita capacidade de processamento computacional para solução, no entanto ao negligenciar alguns termos da equação de momento, podemos simplifica-la e torna-la mais fácil de ser solucionada; desta forma obtém-se: a equação hidrodinâmica ou totalmente dinâmica correspondente à versão completa; onda difusa e onda cinemática.

Entende-se que não necessariamente o modelo mais detalhado e sofisticado, é necessariamente mais adequado. Um modelo simplificado mais robusto e com menos custo computacional poderia mais indicado para um SSD *online* aplicado para funcionar também como um sistema de aviso prévio de cheias.

Empregar plataformas de integração de modelos permite a que se utilize diferentes métodos e configurações, utilizando um banco de dados unificado, sem necessidade de criar diversos arquivos para entradas de dados e fácil visualização e comparação de resultados, outra vantagem deste tipo de plataforma é que permitem comunicação entre os modelos possibilitando utilizar os dados de saída quando pertinente para gerar melhorias dos resultados.

Portanto esta pesquisa tem como objetivo:

- a) Analisar e comparar o desempenho das simplificações das ESV aplicadas na operação de reservatórios para controle de cheias;
- b) Avaliar os impactos destas simplificações em termos de desempenho computacional dos modelos selecionados;
- c) Selecionar dentre os modelos propostos, qual é mais adequado para ser utilizado em um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) *online* aplicado para sistema de aviso prévio de cheias em tempo real;
- d) Utilizar o modelo com maior potencial em um problema de otimização de volume de reservatórios;
- e) Integrar dos modelos selecionados a fim de unificar o banco de dados, troca de dados (comunicação), extração de dados e visualização dos resultados obtidos, esta plataforma criada será a estrutura principal do SSD proposto;

### 2.2.1 Objetivos Especificos

Os objetivos específicos dos trabalho serão portanto avaliar 4 modelos diferentes quanto as suas potencialidades de implementação em um modelo de controle preditivo de cheia para a UHE Três Marias, localizada na bacia do Alto São Francisco, o ponto de controle de cheia definido é a cidade de Pirapora localizada a jusante da barragem:

- I. SOBEK que utiliza a equação hidrodinâmica de Saint-Venant;
- II. SPRNT que utiliza técnicas de aceleração computacional para solucionar a equação hidrodinâmica de Saint-Venant;
- III. MGB-IPH, um modelo chuva-vazão semi-distribuído que utiliza o método de Muskingum-Cunge para determinar o escoamento nos canais de interesse;
- IV. RTC-Tools usando três configurações distintas:
  - a) Onda Difusiva;
    - i. Resolução Espacial Grosseira;

- ii. Resolução Espacial Refinada;
  - b) Cascata de Reservatórios;
- V. Avaliar a eficácia da técnica em otimizar o volume da UHE Três Marias;
- VI. Avaliar a eficácia da técnica em controlar os efeitos de inundação na cidade de Pirapora;

A avaliação dos modelos deverá englobar a precisão, robustez e rapidez de processamento, avaliando também o impacto da resolução espacial e temporal nos resultados das simulações. E por último haverá integração do modelo mais apto em um otimizador para avaliar sua potencialidade para operação dos reservatórios.

## Parte III

### Revisão Bibliográfica



## 3 Represas, Reservatórios e Usinas Hidrelétricas

Neste capítulo serão descritos as partes e o funcionamento de Usinas Hidroelétricas (UHE), Reservatórios e Barragens os impactos geralmente associados a estas estruturas hidráulicas e como funciona a dinâmica destas estruturas hidráulicas, que podem ser usadas tanto para geração energética quanto para combater os impactos de eventos extremos, bem como os riscos envolvidos nesta operação.

### 3.1 Usinas Hidroelétricas e Reservatórios

A seguir segue uma explicação bem sucinta sobre os componentes e funcionamento de usinas de geração hidroelétricas ou usinas hidroelétricas (UHE). A geração de energia por usinas hidroelétricas podem ser feita através do aproveitamento da energia potencial hidráulica da região, este potencial geralmente está associado a uma queda d'água e um volume armazenado de água. Geralmente as UHE's apresentam as seguintes componentes: Barragem, Reservatório, Vertedor, Sistemas de Abdução, Casa de Força e Canal de Fuga.

A barragem é a estrutura civil que serve como barreira aos cursos de água com o objetivo de represar o volume de água que forma o reservatório, que é responsável por armazenar os volumes de água que serão utilizados como energia potencial para geração de energia ou para usos múltiplos.

O volume de água escoar do reservatório por dois caminhos: o primeiro deles o vertedor conduz a água diretamente para o curso de água a jusante e geralmente é utilizado para manter os níveis operacionais da barragem, o segundo os canais de abdução servem para conduzir a água até a casa de força, onde estão as turbinas e geradores, que são responsáveis por transformar a energia potencial hidráulica em energia cinética e finalmente em energia elétrica. E por último o canal de fuga que conduz a água da casa de máquinas ou casa de força de volta para o rio.

De forma bem geral podemos classificar as UHEs conforme seu porte e conforme o tipo de reservação:

- a) Porte da barragem, está relacionado ao tamanho do reservatório e sua capacidade de geração sendo comumente classificados como Usinas Hidrelétricas e Pequenas Centrais Elétricas (PCHs).
- b) Tipo de Reservação: Existem dois tipos UHEs com reservação, as que possuem um

reservatório capaz de estocar água para regularização de vazão e estocar energia potencial, que são geralmente implantados no início de um sistema de operação em cascatas; e as UHEs de operação a meio-fio, estas UHEs não possuem um reservatório capaz de armazenar grandes volumes de água e turbinam toda água que aflui em sua barragem.

As UHEs também estão relacionadas a alguns impactos e problemas, tipicamente estes problemas são a área deflorestada na implantação da UHE, alterações nos regimes fluviais, alterações nos ecossistemas. Outro problema típico de UHE é o assoreamento, devido a criação do reservatório cria-se um sistema lântico que propicia processos de

### Assoreamento de Reservatórios

Como consequência do assoreamento dos rios, podemos citar a redução do volume de água armazenado; o afogamento de locais de desovas, alimentação e abrigo de peixes; o aumento da turbidez da água, prejudicando os aproveitamentos hídricos e reduzindo as atividades de fotossíntese; alteração, destruição e degradação de ecossistemas aquáticos; a degradação da qualidade da água para consumo e conseqüente aumento dos custos de tratamento; a obstrução de canais de irrigação, navegação e trechos de cursos d'água; a formação de bancos de areia dificultando e alterando rotas de navegação; a dificuldade ou impedimento da entrada de água em estruturas hidráulicas de sistemas de captação

A deposição de sedimentos em reservatórios é um processo complexo que apresenta inúmeros fatores de influência, como o tamanho e a forma do reservatório; a razão entre a capacidade do reservatório e o tamanho da bacia; a razão entre a capacidade do reservatório e o deflúvio afluente; a topografia da bacia, uso da terra e cobertura vegetal; bem como a declividade e densidade da rede de canais; e características físicas e químicas do sedimento afluente

O problema no qual este projeto se foca, ocasionado pela deposição de sedimentos em reservatórios é a redução na produção de energia elétrica. Isto gera redução de receita com a produção energética, além de poder ocasionar problemas de manobras de operação nas estruturas hidráulicas da usina e gastos com dragagem de sedimentos nas proximidades da tomada d'água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009).

Neste contexto, de modo a evitar problemas futuros e minimizar os problemas já existentes, medidas corretivas e preventivas devem ser tomadas em conjunto.

Apesar de o problema de assoreamento do reservatório ser inevitável, pode-se minimizar parte desses problemas causados pela deposição de sedimentos nos reservatórios, tendo assim, um controle dos sedimentos afluentes ao reservatório por meio destas medidas, pois o assorea-



mento causa grandes despesas ou até mesmo conseqüências irreversíveis às obras hidráulicas (CARVALHO et al., 2000).

As medidas preventivas são mais econômicas, porém, apresentam resultados em longo prazo. Na década 1970, os estudos de impacto ambiental, e de sedimentação não eram obrigatórios no projeto e construção de usinas hidrelétricas como são hoje

A deposição destes sedimentos no fundo do rio geram alteração do relevo do fundo do reservatório, geralmente tendo como consequência a perda capacidade de armazenamento devido ao assoreamento. Desta maneira os sedimentos depositam no fundo da barragem, alterando esta capacidade de reservação. Em outras palavras, a condição original do levantamento topográfico prévio ao enchimento do reservatório é alterada, passando não mais condizer com a atualidade.

Quanto maior a idade do reservatório menor será a fidelidade do dado anterior ao enchimento com a condição real, devido a maior quantidade de sedimentos acumulados no reservatório e por isso uma menor capacidade de armazenamento de água, o que pode vir a gerar problemas de gestão.

O problema no qual este projeto se foca, ocasionado pela deposição de sedimentos em reservatórios é a redução na produção de energia elétrica. Isto gera redução de receita com a produção energética, além de poder ocasionar problemas de manobras de operação nas estruturas hidráulicas da usina e gastos com dragagem de sedimentos nas proximidades da tomada d'água (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009).

Mais de 25% da descarga global de sedimentos suspensos é considerada ser retida pelos reservatórios (VÖRÖSMARTY et al., 1997). Este acúmulo de sedimentos infligiu muitos danos desde o fim do século 20: Nos EUA, reservatórios passaram por reformas ou mesmo precisaram ser desativados e demolidos, nos rios Eufrates, Mekong, Syr Darya observa-se conflitos de uso da água reservada entre países à jusante e à montante, bem como sedimentação.

Um estudo do Banco Mundial (MAHMOOD, 1987) mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no Mundo decresceu de 100 para 22 anos, sendo avaliado em 6 bilhões de dólares anuais o custo para promover a remoção dos volumes que vão sendo assoreados. Foi demonstrado também que a perda média anual de volume dos reservatórios devido ao depósito de sedimentos era de 1%, sendo variável de país para outro, bem como de região para outra.

Os custos para recuperação ou desativação das existentes infra-estruturas são provavelmente enormes (UNESCO, 2009). A reparação, o fortalecimento ou modificação de estruturas de antigas barragens, por exemplo, implicará em expressivos gastos. Em casos extremos, uma decisão reacionária seria a desativação de uma barragem, quando esta não mais desempenhar

seu papel, como nos casos em que é velha e insegura, onde o nível do sedimentado está alto ou em locais onde o fluxo do rio precisa ser mantido para a pesca ou para outros ecossistemas. A recuperação e a desativação também devem ser escolhidos de acordo com os custos, se os custos de manutenção excederem seus benefícios financeiros e econômicos futuros. (WORLD COMMISSION ON DAMS, 2000).

Apesar de o problema de assoreamento do reservatório ser inevitável, pode-se minimizar parte desses problemas causados pela deposição de sedimentos nos reservatórios, tendo assim, um controle dos sedimentos afluentes ao reservatório por meio destas medidas, pois o assoreamento causa grandes despesas ou até mesmo consequências irreversíveis às obras hidráulicas (CARVALHO et al., 2000).

Segundo mesmo autor, como consequência do assoreamento dos rios, ocorre redução do volume de água armazenado; o afogamento de locais de desovas, alimentação e abrigo de peixes; o aumento da turbidez da água, prejudicando os aproveitamentos hídricos e reduzindo as atividades de fotossíntese; alteração, destruição e degradação de ecossistemas aquáticos; a degradação da qualidade da água para consumo e consequente aumento dos custos de tratamento; a obstrução de canais de irrigação, navegação e trechos de cursos d'água; a formação de bancos de areia dificultando e alterando rotas de navegação; a dificuldade ou impedimento da entrada de água em estruturas hidráulicas de sistemas de captação.

## 3.2 Usos Múltiplos

Existem diversas atividades para os quais os recursos hídricos são utilizados, entre eles existem os usos consuntivos da água, que são definidos os usos em que há perda entre o captado e devolvido, ou seja que retiram a água de sua fonte natural diminuindo suas disponibilidades, espacial e temporalmente. Exs: dessedentação de animais, irrigação, abastecimento público, processamento industrial, etc.

Já os usos não-consuntivos não implicam em perda entre o captado, ou utilizado e o devolvido, ou seja referem-se aos usos que retornam à fonte de suprimento, praticamente a totalidade da água utilizada, podendo haver alterações no seu padrão temporal de qualidade. Exs: navegação, recreação, piscicultura, hidroeletricidade, etc.

Conforme prevê a Lei nº 9.433, a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. Assim, todos os setores usuários da água têm igualdade de acesso aos recursos hídricos. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) só traz uma exceção a esta regra, que vale para situações de escassez, em que os usos prioritários da água passam a ser o consumo humano e a dessedentação de animais.

Como as demandas por água para os mais variados usos vêm aumentando, o número de conflitos de interesses envolvendo a água também cresceu. Por isso, a ANA age no sentido de mediar tais conflitos no Brasil que podem contrapor diversos setores, como: elétrico e hidrovial, saneamento e turismo, irrigação e elétrico, etc.

Para garantir os usos múltiplos da água, a Agência também trabalha para prevenir ou minimizar os efeitos de secas e inundações, por meio de sua Sala de Situação. Ela também trabalha planejando e promovendo ações para prevenir ou minimizar os efeitos de secas e inundações, em articulação com o órgão central do Sistema Nacional de Defesa Civil, por meio de sua Sala de Situação. O objetivo principal desta Sala é acompanhar as tendências hidrológicas em todo o território nacional, com a análise da evolução das chuvas, dos níveis e das vazões dos rios e reservatórios, da previsão do tempo e do clima, bem como a realização de simulações matemáticas que auxiliam na prevenção de eventos extremos.

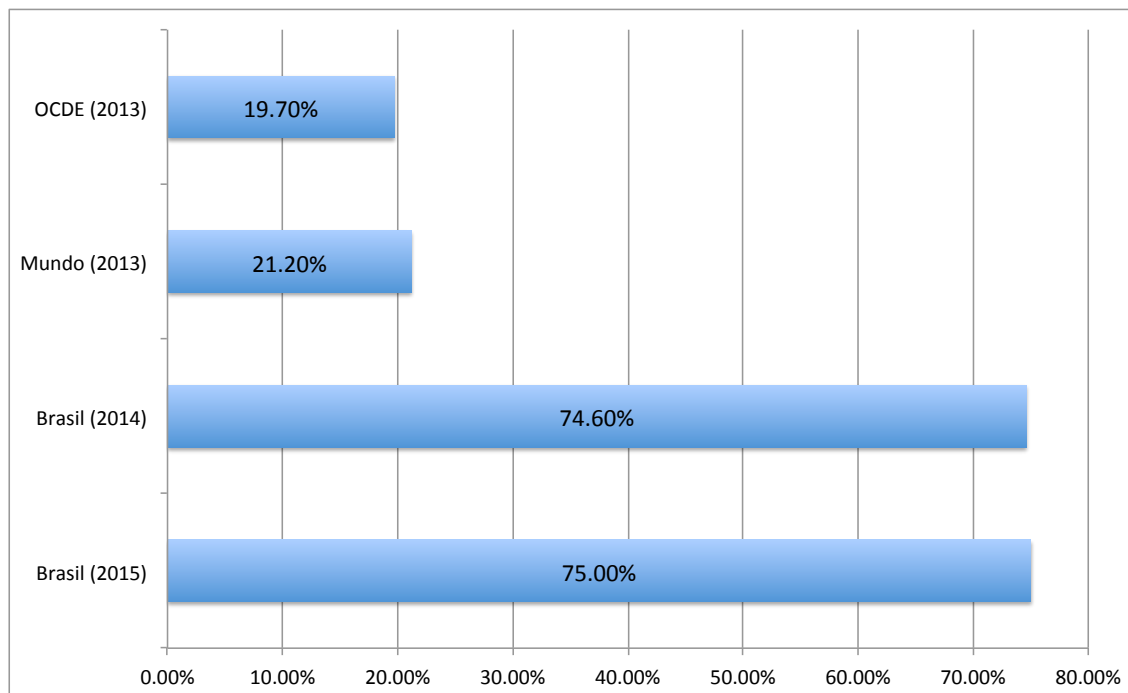
Também visando a garantir o uso múltiplo dos recursos hídricos, a controlar as enchentes e a mitigar as secas, a ANA define as condições de operação de reservatórios por agentes públicos e privados, em consonância com os planos das respectivas bacias hidrográficas e em articulação com o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, em caso de reservatórios de aproveitamentos hidrelétricos.

A disponibilidade de quantidade e qualidade de recursos hídricos, não é só um requisito básico para o desenvolvimento humano como a própria sobrevivência depende deste bem.

### 3.3 Setor Hidroenergético Brasileiro

O Brasil é bastante progressista em relação ao setor energético, uma vez que há grande participação das fontes renováveis como energia solar, eólica e hidrelétrica em sua matriz elétrica (Figura 2). A porcentagem de fontes renováveis na matriz elétrica nacional é quase 3,6 vezes maior comparada com a média mundial e quase 3,8 vezes maior do que a média dos países que compõem a OCDE ( Organização para Cooperação e desenvolvimento Econômico), que são em sua grande maioria países de alto desenvolvimento econômico e social. A participação destas modalidades, que são consideradas menos poluentes, representam quase 75% de toda a eletricidade produzida no país (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS, 2016).

No entanto esta porcentagem alta se deve devido a enorme participação parte da energia produzida por fontes renováveis provém de energia hidrelétrica. Esta participação deverá diminuir nos próximos anos visto que quase toda a reserva nacional foi explorada sendo que grande parte do potencial hidroelétrico disponível no território nacional já foi explorado, existindo poucas bacias hidrográficas que ainda permitem a construção de grandes reservatórios. A Tabela 2,



Adaptado de Empresa de Pesquisas Energéticas e Ministério de Minas e Energias (2016)

Figura 2 – Comparação da Participação de Fontes de Energias Renováveis na Matriz Elétrica.

mostra que cerca 80% todo o potencial hidrelétrico, 110 GW dos 136 GW, já foi medido ou inventariado, restando 25,7 GW para serem viabilizados.

Tabela 2 – Recursos e Reservas Energéticas Brasileiras em 2013.

	Unidade	Medido/Indicado /Inventariado	Inferido /Estimado	Total	Equivalência Energética 10 <sup>3</sup> tep
<b>PETRÓLEO</b>	10 <sup>2</sup> m <sup>3</sup>	2.572.700	47.925.600	50.498.300	2.289.703
<b>GÁS NATURAL</b>	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	471.148	388.689	859.837	467.850
<b>CARVÃO MINERAL</b> <sup>1</sup>	10 <sup>6</sup> t	25.742	6.535	32.277	7.027.666
<b>HIDRÁULICA</b> <sup>2</sup>	GW	110,3	25,7	136,0	83.082
<b>ENERGIA NUCLEAR</b> <sup>3</sup>	t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	177.500	131.870	309.370	1.254.681

Não inclui demais recursos energéticos renováveis.

<sup>1</sup> Considera recuperação de 70% e poder calorífico de 3.900 kcal/kg.

<sup>2</sup> Valor anual para fator de capacidade de 55%.

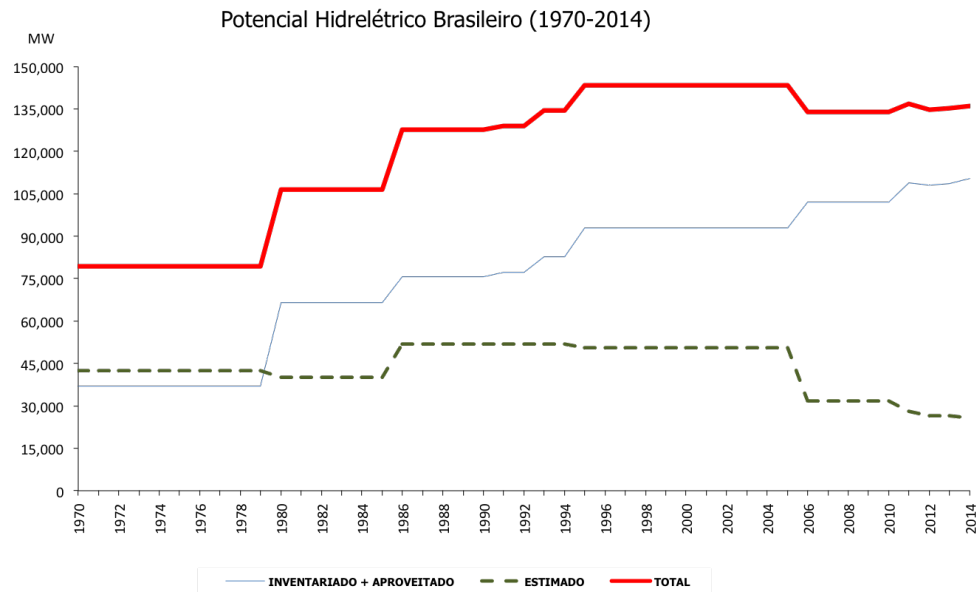
<sup>3</sup> Considera perdas de mineração e beneficiamento e não considera reciclagem de plutônio e urânio residual.

<sup>4</sup> Calculado sobre as reservas medidas/indicadas/inventariadas.

Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas e Ministério de Minas e Energias (2016)

De forma a complementar este conceito, a Figura 3 mostra a evolução do potencial hidroelétrico no país, nesta figura observa-se que nos últimos 40 anos houve uma grande expansão no aproveitamento destes recursos na geração de energia elétrica, havendo um aumento de cerca de 50% entre 1978 e 1996. Porém este potencial energético já foi quase que totalmente explorado, não havendo um horizonte para grande aumento na exploração deste recurso para fins de geração elétrica. Portanto urge que haja maior governança e melhorias na gestão e operação

dos reservatórios existentes.



Fonte: (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS, 2016)

Figura 3 – Evolução do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (1970-2014).

### 3.4 Expansão Planejada do Setor Hidrelétrico

Embora não haja muito potencial hidroelétrico restante a ser explorado e inventariado, este setor ainda possui papel significativo na expansão energética nacional. A expansão hidrelétrica planejada prevista até 2021 é de um acréscimo de 19 empreendimentos totalizando 19673 MW instalados para grandes centrais hidrelétricas, um aumento de 25,54% (MME/EPE, 2015).

Segundo o mesmo relatório a taxa média de crescimento do consumo energético nacional é de 3,9% ao ano, e o consumo nacional de energia elétrica para 2024 está estimado para atingir o valor de cerca de 692TWh. Portanto para suprir esta demanda crescente de está sendo planejada uma expansão do parque hidroelétrico brasileiro com a construção e implantação de novas hidrelétricas em todo o território brasileiro nos próximos anos.

Segundo a Tabela 3, deverão ser viabilizados até 2024 22 UHEs que somadas adicionarão aproximadamente 28,35 GW de potência instalada na infraestrutura nacional. Observa-se que os empreendimentos planejados indicam uma tendência em construção de usinas de menor porte na porção sul do país e de usinas de grande porte nos estados da região norte principalmente no Pará.

Outra característica interessante desta expansão é que estão planejados mais de um empreendimento em um mesmo rio em um espaço temporal relativamente curto, por exemplo

rio Teles Pires com 3 UHEs planejadas (UHE Teles Pires, UHE CoOlíder e UHE São Manoel) e rios Piquiri e Tapajós com 2 Usinas planejadas para cada rio. O que reforça a necessidade de uma ação integrada e planejamento de operação.

Tabela 3 – Expansão hidrelétrica planejada (2015-2024).

Entrada em Operação Ano	Projeto	Rio	Potência (MW)	UF
2015	UHE Teles Pires	Teles Pires	1.820	PA
	UHE Belo Monte	Xingu	11.233	
2016	UHE Colíder	Teles Pires	300	MT
	UHE Salto Apicás	Apicás	45	
	UHE São Roque	Canoas	135	
2017	UHE Cachoeira Caldeirão	Araguari	219	AP
	UHE Baixo Iguaçu	Iguaçu	350	
2018	UHE São Manoel	Teles Pires	700	PA
	UHE Sinop		400	
2019	UHE Itaocara I	Paraíba do Sul	150	RJ
2021	UHE São Luiz do Tapajós	Tapajós	8.040	PA
	UHE Tabajara	Jiparaná	350	
	UHE Apertados	Piquiri	139	
2022	UHE Foz Piquiri		93	PR
	UHE Telêmaco Borba	Tibagi	118	
	UHE Ercilândia	Piquiri	87	
2023	UHE Comissário		140	PA
	UHE Paranhos	Chopim	67	
2024	UHE Jatobá	Tapajós	2.338	MT
	UHE Castanheira	Arinos	192	
	UHE Bem Querer	Branco	708	
	UHE Itapiranga	Uruguai	725	

FONTE: MME/EPE (2015)

### 3.5 Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é uma autarquia vinculada ao Ministério de Minas e Energias criada em 1997 que tem como atribuição principal:

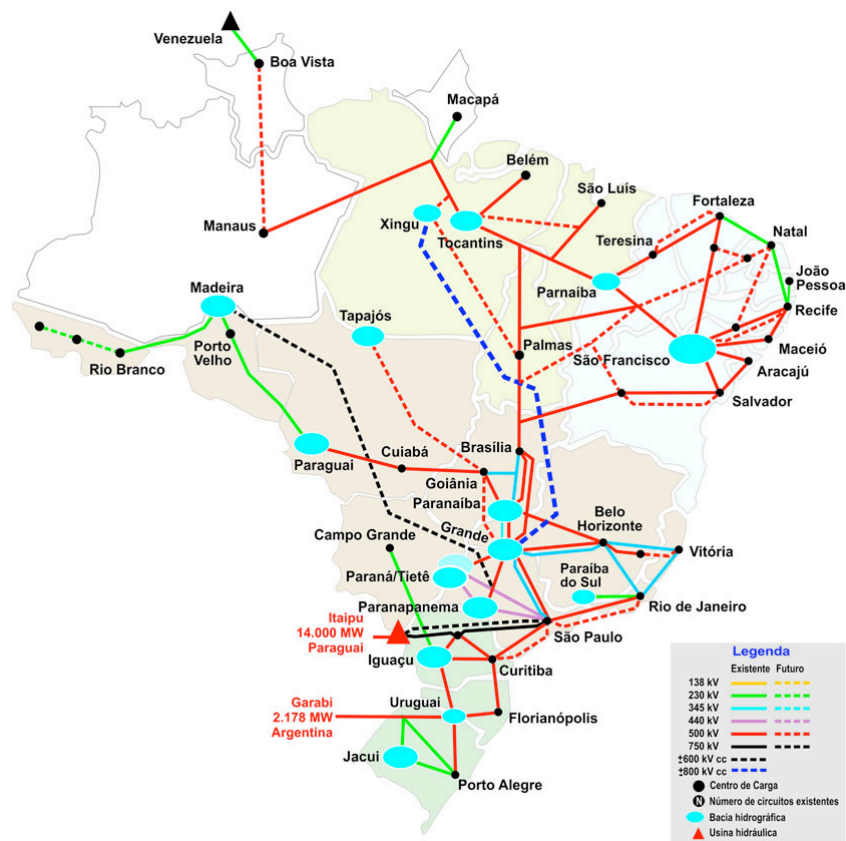
- a) Regular a geração, produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica;
- b) Fiscalizar, diretamente ou mediante convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica;
- c) Implementar as políticas e diretrizes do governo federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos;
- d) Estabelecer tarifas;
- e) Promover as atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica;

## 3.6 Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

### 3.6.1 Sistema Interligado Nacional - SIN

O SIN ou Sistema Interligado Nacional é o sistema de interligação de geração elétrica do território brasileiro. O tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 1,7% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica.



Fonte: (ONS, 2015)

Figura 4 – Integração Eletroenergética Brasileira.

### 3.6.2 Políticas e Regras de Operação da ONS

ONS (2011b) define quatro categorias de condições de risco de operação de reservatórios, sendo que cada situação define diferentes riscos de inundação, riscos de violação de vazão de restrição (Vazão Máxima) e da disponibilidade de volume de espera conforme os valores permitidos pelas Regras Operacionais de Políticas de Controle de Inundação.

As quatro situações de operação são: Situação Normal, Situação de Atenção, Situação de Alerta e Situação de Emergência. Em uma condição de risco normal de inundação, não há risco de inundação, nem violação da descarga ou armazenagem; Estado de Atenção há risco de uma inundação ou o armazenamento está cheio, mas sem indicativo de máxima violação de descarga; Condição de Alerta é caracterizada por evento de risco de inundação, com pleno armazenamento e um indicativo de máxima violação de descarga; e condição de emergência significa que não há evento de risco de inundação com pleno armazenamento e máxima de descarga violação. Além do normal e atenção Condições, o operador tem pouca ou nenhuma liberdade operacional, apenas sob condições de alerta e de emergência, o operador pode decidir os valores-alvo para o vertedouro e para geração hidroelétrica.

Segundo ONS (2009b), a coordenação centralizada tem como objetivo otimizar o SIN globalmente e não otimizar cada unidade geradora de energia (incluindo das UHEs) individualmente. As regras de funcionamento para as políticas de controle de enchentes são baseados em cenários criados usando vazões históricas, séries hidrológicas sintéticas, resultando em um documento de orientação off-line que contém uma tabela que descreve diferentes restrições de operação em relação a diferentes condições de riscos de inundação (ONS, 2011b). No Apêndice A estão sumarizados estas caracterizações das situações de operação de reservatórios e critérios para caracterização da situação no período de controle de cheias (PCC).

Os despachos energéticos são feitos pela ANEEL e pelo ONS utilizando-se de recursos computacionais, existindo metas mensais e semanais, cuja programação é divulgada para os operadores com frequência. Este planejamento e controle é centralizado e feito de forma a otimizar e atender demandas e ofertas da infraestrutura do SIN como um todo.

## 3.7 NEWAVE - Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo

O planejamento dos despachos hidrelétricos é feito através de um gerenciamento e otimização centralizada pela ONS, que utiliza o modelo NEWAVE-DECOMP que a partir de previsões de vazão e de carga conseguem realizar uma otimização do uso deste recursos. O objetivo básico do planejamento da operação deste sistema é determinar, a cada mês, metas de geração para cada usina do sistema que atendam à demanda e minimizem o valor esperado



do custo de operação ao longo do período de planejamento. Esse custo é composto pelo custo variável de combustível das usinas termelétricas e pelo custo atribuído às interrupções de fornecimento de energia, representado por uma função de penalização dos déficits de energia.

A decisão sobre quando utilizar os estoques de energia, representados pela água armazenada nos reservatórios, está intrinsecamente ligada à incerteza quanto às afluições futuras, devendo resultar de uma análise probabilística de seu comportamento. Além disso, a decisão operativa mais adequada dependerá das condições do sistema. Assim, é preciso determinar uma decisão operativa em função dos possíveis estados do sistema. Em sistemas com forte participação de hidrelétricas, dois tipos de informação compõem o estado do sistema: os níveis de armazenamento dos reservatórios e a tendência hidrológica futura do sistema, a qual pode ser representada pelas afluições aos reservatórios nos meses anteriores (CCCE-ONS, 2015).

Como a estratégia de operação deve ser calculada para todas as combinações de níveis de armazenamento e tendência hidrológica, o problema da operação ótima do sistema torna-se rapidamente intratável do ponto de vista computacional. No caso do sistema brasileiro, com mais de 100 reservatórios, torna-se necessário reduzir o número de variáveis de estado através da agregação dos diversos reservatórios de uma mesma região em um reservatório equivalente de energia, definindo, assim, um subsistema equivalente.

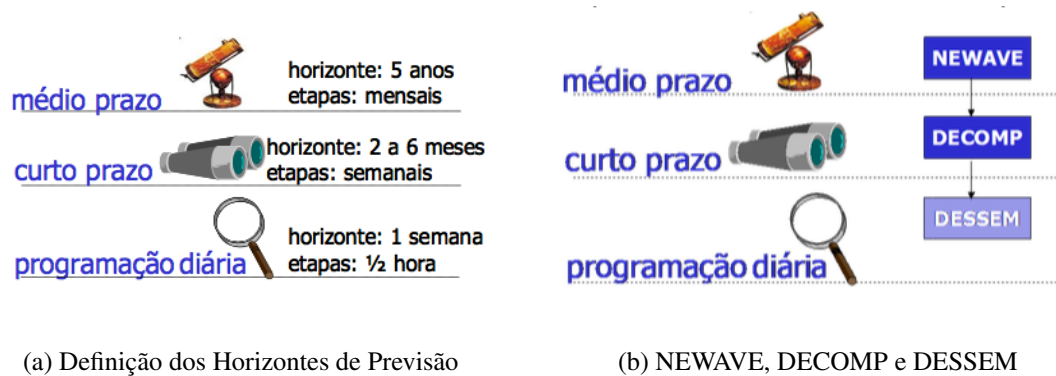
Sistemas com uma porcentagem substancial de geração hidrelétrica podem utilizar a energia armazenada “grátis” nos reservatórios do sistema para atender à demanda, substituindo a geração dispendiosa das unidades termelétricas. Entretanto, o volume de água afluyente aos reservatórios é desconhecido, pois depende das chuvas que ocorrerão no futuro. Além disso, a disponibilidade de energia hidrelétrica é limitada pela capacidade de armazenamento nos reservatórios. Introduce-se, assim, uma relação entre a decisão de operação em um determinado estágio e as consequências futuras de tal decisão.

A existência de interligações entre submercados permite uma redução dos custos de operação, por meio do intercâmbio de energia, e um aumento da confiabilidade de fornecimento, através da repartição das reservas. Em sistemas hidrotérmicos, é necessário determinar o valor da geração hidrelétrica, dado pelo valor da geração térmica que se poderia substituir hoje ou no futuro.

Este valor é calculado como uma etapa do processo de determinação da política ótima. Com este conceito, pode-se representar uma hidrelétrica como uma “térmica”, cujo custo marginal de operação é o valor da água.

Este valor não se mede de maneira isolada em cada usina, pois depende da operação conjunta do sistema. Para se obterem ganhos operativos máximos de um sistema hidrotérmico

interligado, é necessário operar o sistema de maneira integrada, otimizando conjuntamente a operação de todos os subsistemas e submercados, com o objetivo de minimizar o custo total de operação e caracterizando este problema como de grande porte. No Brasil, e em diversos países, a solução do problema é obtida em etapas. Nestas etapas, são utilizados modelos com diferentes graus de detalhe para representação do sistema, abrangendo períodos de estudos com horizontes distintos, denominados de longo e médio prazo – modelo NEWAVE, curto prazo – modelo DECOMP (Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Curto Prazo) e programação da operação diária – modelo DESSEM (Modelo de Despacho Hidrotérmico de Curto Prazo) Figura 5 .



(a) Definição dos Horizontes de Previsão

(b) NEWAVE, DECOMP e DESSEM

Fonte: CCCE-ONS (2015).

Figura 5 – Horizontes de Previsão para o NEWAVE, DECOMP e DESSEM

O NEWAVE foi desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), no âmbito do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente (DEA), para aplicação no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos interligados de longo e médio prazo, com representação agregada do parque hidrelétrico e cálculo da política de operação baseado em Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE). É composto por quatro módulos computacionais:

### 1. Módulo de cálculo dos sistemas equivalentes e energias afluentes

Para cada subsistema, os reservatórios são agregados em um único reservatório equivalente de energia. A capacidade de armazenamento de cada reservatório equivalente é estimada pela energia produzida pelo esvaziamento completo dos reservatórios do subsistema, adotando-se a hipótese de operação em paralelo. Também agrega as vazões afluentes a cada subsistema em fluências energéticas equivalentes.

### 2. Módulo de cálculo do modelo estocástico de energias afluentes – modelo GEVAZP

Estima os parâmetros do modelo estocástico de energias afluentes aos subsistemas que é

utilizado no módulo do cálculo da política de operação hidrotérmica. Este modelo estocástico também é empregado na geração de séries sintéticas de energias afluentes para análise de desempenho no módulo de simulação da operação.

### **3. Módulo de cálculo da política de operação hidrotérmica**

Determina a política de operação mais econômica para os subsistemas equivalentes, com base no algoritmo de Programação Dinâmica Dual Estocástica (PDDE), considerando as incertezas nas afluências futuras, os patamares de demanda e a indisponibilidade dos equipamentos. Considera também a representação de restrições de despacho antecipado para usinas a GNL.

### **4. Módulo de simulação da operação**

Simula a operação do sistema ao longo do período de planejamento, para distintos cenários de sequências hidrológicas, falhas dos componentes e variação da demanda, com base na política de operação obtida no módulo anterior. Calcula índices de desempenho, tais como a média dos custos de operação, o risco de déficit e os valores esperados de energia não suprida.

A versão executável do programa NEWAVE está disponível em ambiente de alto desempenho. Ele foi o primeiro programa da Cadeia de Modelos Energéticos do CEPREL a utilizar técnicas de processamento distribuído. Recentemente, o mecanismo de aversão a risco CVaR (Valor Condicionado a um dado Risco) foi internalizado no modelo, adicionando à função objetivo uma parcela referente ao custo dos cenários hidrológicos mais caros, com o objetivo de propiciar uma maior segurança no suprimento.

O Programa NEWAVE é utilizado nas seguintes atividades do Setor Elétrico Brasileiro:

- a) Planejamento da Expansão.
- b) Planejamento da Operação.
- c) Comercialização – Cálculo do Preço de Liquidação de Diferenças(PLD).
- d) Definição e Cálculo da Garantia Física e da Energia Assegurada de Empreendimentos de Geração.
- e) Elaboração de Diretrizes para os Leilões de Energia.

#### **3.7.1 Diretrizes e Regras de Operação de Controle de Cheia**

Segundo ONS (2015), o planejamento da operação hidráulica para controle de cheias dos reservatórios do SIN é realizado em duas etapas:

- a) Estudos de prevenção de cheias, para determinar as necessidades de recursos físicos para o controle de cheias;
- b) Estudos para definir diretrizes para as regras de operação de controle de cheias, onde são estabelecidas as medidas e ações (tanto administrativas quanto de engenharia) que deverão ser tomadas durante os eventos de cheia

Em sistemas de reservatórios para controle de cheias, as situações de operação de reservatórios devem ser caracterizadas no ponto de controle, e no reservatório situado imediatamente a montante da restrição (caso de restrição de jusante) ou imediatamente a jusante da restrição (caso de restrição de montante), de modo que os demais reservatórios desse sistema, mesmo que aloquem volume de espera, não acompanham essa caracterização de situação de operação.

## 4 Modelagem de Bacia Hidrográficas

Os modelos matemáticos e métodos numéricos tem sido empregados nas mais diversas atividades para facilitar o entendimento de processos, para os recursos hídricos, estes modelos servem como discretizações e simplificações numéricas dos complexos processos que ocorrem na natureza, a fim de auxiliar pesquisadores e tomadores de decisão a terem uma melhor compreensão dos processos envolvidos, de maneira à auxiliar na gestão e tomada de decisões em relação a estes processos.

O processo de utilização de um modelo é conhecido como simulação. A simulação nada mais é do que a solução de um conjunto de expressões matemáticas estruturadas em sequência lógica, que transforma dados de entrada e parâmetros em resultados. Realizando várias simulações pode-se, testar, verificar, modificar e avaliar diferentes estratégias de utilização dos recursos hídricos e assim escolher a que for considerada a mais adequada.

A Figura 6 de Beven (2012), mostra a sequencia geralmente adotada para modelagem, a primeira etapa dos modelos perceptuais são definidos os processos que tem impacto no objeto ou área de estudo como por exemplo para um estudo de produção de sedimentos os principais processos envolvidos são a precipitação e condições dos solo; em seguida o modelo conceitual irá aprofundar sobre os processos definidos na etapa anterior, tomando o mesmo exemplo pode se optar por estudar a produção de sedimentos usando diferentes equações EUPS (Equação Universal de Perda de Solos), MEUPS (Modificação da Equação Universal de Perda de Solos) ou mesmo REUPS (Revisão da Equação Universal da Perda de Solos); a terceira etapa Modelo Procedural seria aquela em que as entradas de dados para as equações são feitas de forma permitir executar as simulações, a quarta etapa de calibração é a etapa de ajuste de parâmetros ou seja ajustar as incertezas dos dados de entrada a última seria a da validação, porém numa realidade bastante dinâmica, onde os locais estão sofrendo alterações de forma constante calibração pode perder validade rapidamente, sendo necessário recalibrar os modelos constantemente, o que torna a validação dos modelos uma tarefa de difícil aplicação.

Segundo Tucci (1998), as técnicas de modelagem são ferramentas essenciais para o planejamento e tomada de decisões dentro do complexo processo de condições naturais e para a interferência do homem. Estes modelos mostram ser úteis e versáteis uma vez que permitem avaliar as mais diversas questões relevantes aos recursos hídricos, bem como permitem geração de simulações e cenários. Através de cenários é possível entender a magnitude dos efeitos de eventos de estresse como escassez de água e como eles podem causar mudanças na bacia, rio ou reservatório influenciando tanto a disponibilidade quanto a qualidade da água, e desta forma

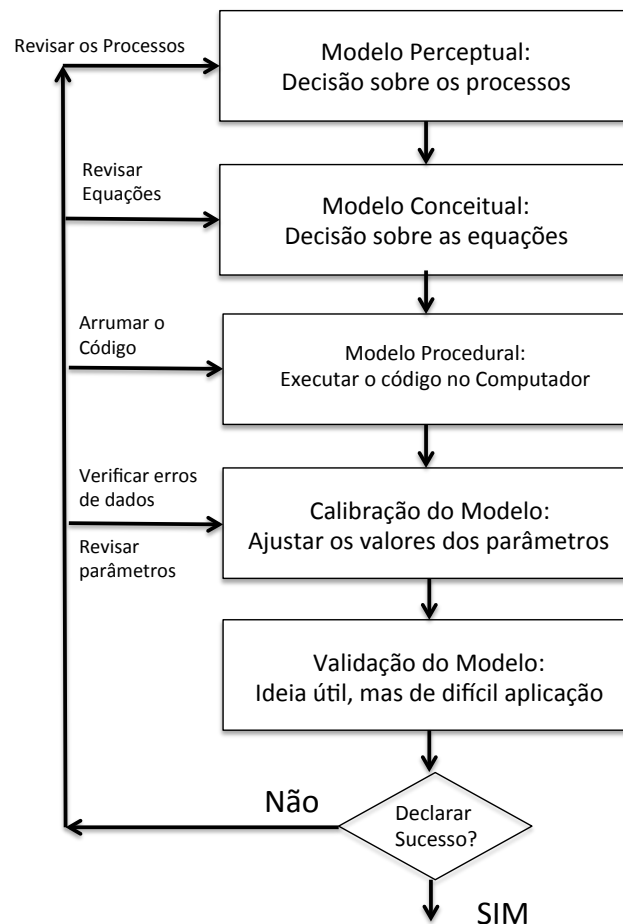


Figura 6 – Esquema das Etapas do Processo de modelagem.

Fonte: adaptado de Beven (2012)

é possível avaliar e planejar ações mitigadoras para promover a gestão otimizada dos recursos hídricos.

(RIGHETTO, 1998) comenta que a gestão de recursos hídricos compreende estudos, planejamento e ações para resolver as questões de escassez relativas aos recursos hídricos de uma determinada região. Dentre as várias atividades que merecem destaque na engenharia de sistemas hídricos pode-se citar a modelagem, simulação computacional e análise de cenários para tomada de decisão.

Para auxiliar as atividades de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos de uma bacia hidrográfica modelos de planejamento são os mais adequados. Estes modelos são aqueles que simulam condições globais de um sistema maior, envolvendo uma região ou uma bacia hidrográfica e que buscam não somente a solução meramente hidráulica, hidrológica ou econômica, mas que engloba, também, fatores socioeconômicos e ambientais. Esse tipo de

---

modelo utiliza vários tipos de modelos matemáticos e técnicas de análise para disciplinar as ações e investimentos (TUCCI, 1998).

Apesar dos modelos possuírem potencialidades e terem sido desenvolvidos para fins diferentes e públicos diferentes, geralmente eles são projetados com o objetivo comum de proporcionar e facilitar a visão geral dos participantes do processo decisório dos processos que envolvem os sistemas hídricos, tais como; funcionamento deles, entendimento dos possíveis impactos econômicos, hidrológicos e ambientais de diferentes estratégias de desenvolvimento e gestão de uma determinada região. Assim devem possuir características para facilitar a entrada e armazenamento de dados para simulação e visualização dos resultados.

Uma das principais características que diferenciam esses modelos são as interfaces gráficas. Estas interfaces são desenvolvidas para dar ao usuário o controle da operação dos diferentes componentes e ferramentas dos modelos, como entrada de dados, simulações, otimizações, visualização dos resultados, análise de sensibilidade, análises estatísticas e outras.

Além das técnicas de simulação os modelos de planejamento também utilizam as técnicas de otimização. Portanto, esses modelos são capazes de simular um sistema e de identificar uma solução que maximiza ou minimiza uma determinada função objetivo. Segundo Righetto (1998) a gestão de recursos hídricos compreende estudos de planejamento e ações para resolver as questões de escassez relativas aos recursos hídricos de uma determinada região, sendo destacadas a modelagem, simulação computacional e análise de cenários para tomada de decisão.

Quanto a isso, a utilização de técnicas de simulação e otimização em conjunto tem sido realizada há muito tempo. Com o aumento significativo da capacidade de processamento de computadores pessoais dos últimos anos, o potencial do uso conjunto dessas técnicas aumentou expressivamente.

A esse respeito, as técnicas de simulação e de otimização são ferramentas importantes de suporte a decisão que serão cada vez mais utilizadas na prática da engenharia de recursos hídricos. Muitos problemas de otimização apresentavam-se complexos demais para serem resolvidos. No entanto, atualmente a capacidade de processamento dos microcomputadores está fazendo com que os problemas de dimensão se tornem cada vez menos relevante.

Existem diversos tipos de modelos hidrológicos descritos na literatura, sendo possível classificá-los em teóricos ou empíricos, sendo que um modelo teórico é baseado em princípios físicos, um modelo físico seria aquele cujo todos os processos que ele aborda são baseados em funções matemáticas e os modelos empíricos seriam aqueles em que os processos abordados pelos mesmos são representações dos dados observados. Atualmente a maioria dos modelos existentes tem sua componente física simplificada e incorporam componentes empíricas. Con-

forme os resultados obtidos podem classificar estes modelos em estocásticos, quando uma ou mais variáveis são consideradas aleatórias podendo variar imprevisivelmente com o tempo ou determinísticos, quando as variáveis estão livres de uma variação aleatória (LOUKS; BEEK, 2005).

## 4.1 Modelos Hidrológicos

De acordo com Moradkhani e Sorooshian (2008), os modelos hidrológicos são representações simplificadas de processos que acontecem no mundo real, e portanto o melhor modelo é o que consegue obter resultados que melhor representem a realidade com o menor número de parâmetros e complexidade. Este tipo de modelo é usado para estimar comportamentos e entendimento de diversos processos hidrológicos. (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015) cita que os principais entradas de dados para estes modelos são dados de precipitação e área de drenagem, juntamente com estes dados características da bacia hidrográfica como propriedades do solo, uso e ocupação do solo, topografia, e características de água subterrânea também são consideradas.

### HBV

O modelo hidrológico *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* ou HBV foi um dos primeiros modelos hidrológicos desenvolvidos, ele foi inicialmente desenvolvido para ser aplicado em bacias hidrográficas escandinavas (BERGSTRÖM; FORSMAN, 1973; BERGSTRÖM, 1995), mas provou-se aplicável também em regiões tropicais e subtropicais (ZHANG; LINDSTRÖM, 1997). Este modelo basicamente simula vazões a partir de dados de precipitação, temperatura e estimativas de evaporação potencial, e através de diferentes rotinas para representar derretimento e acúmulo de neve, capacidade de campo e evaporação, água subterrânea, geração de escoamento superficial e propagação por canais (HARLIN; KUNG, 1992).

### SAC-SMA

O modelo conceitual chuva-vazão *Sacramento Soil Moisture Accounting* (SAC-SMA) (BURNASH; FERRAL; MCGUIRE, 1973; BURNASH, 1995), utiliza parametrização espacial aglomerada e é geralmente aplicado para bacias hidrográficas de 300 até 5.000 km<sup>2</sup>, as simulações deste modelo geralmente são feitas para escalas de tempo que variam a cada 6 horas, mas é possível simular utilizando qualquer escala temporal. (FINNERTY et al., 1997)

Este modelo representa a zona hidrologicamente ativa do solo em duas camadas: uma camada fina superior e outra mais profunda e espessa. Cada camada consiste de tensões, cujos componentes são deflagrados por processos mais lentos como evapotranspiração e difusão; e armazenamento de água livre, cujos componentes são ocasionados por processos mais rápidos



de força gravitacional. Estas camadas interagem entre si para gerar estados de umidade de solo e um total de 5 componentes de escoamento, conforme pode ser visto na Figura 7 (ANDERSON; KOREN; REED, 2006).

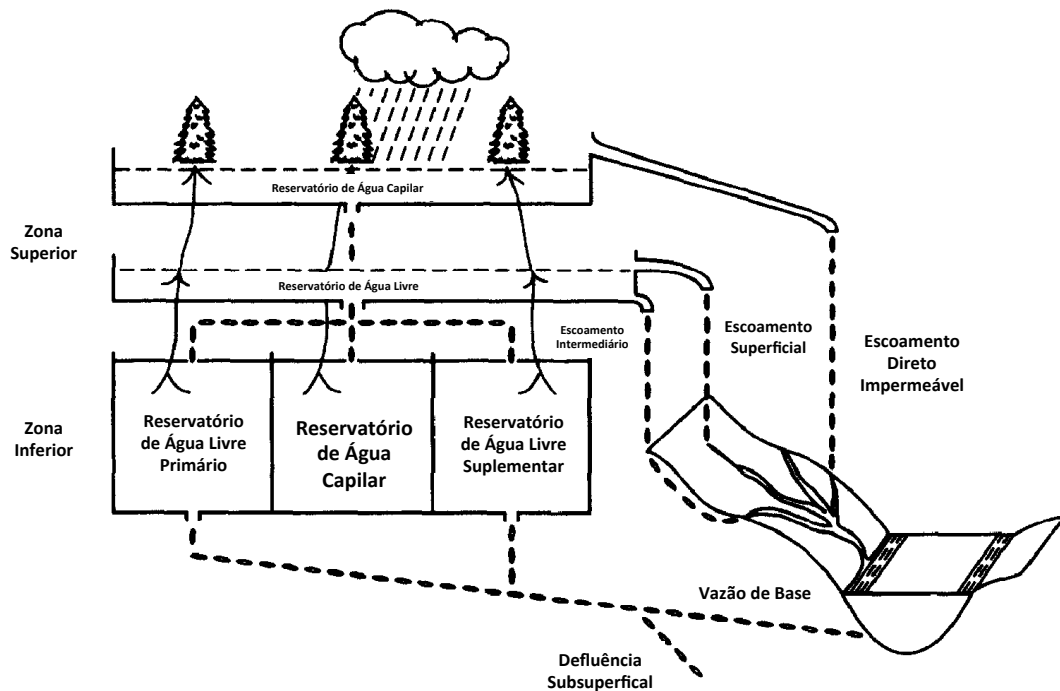


Figura 7 – Conceitualização do modelo SAC-SMA, ilustrando os armazenamentos de umidade do solo, componentes de escoamento superficial e trocas entre superfície do solo e atmosfera

Fonte: adaptado de Finnerty et al. (1997)

## HEC-HMS

O *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) é um modelo chuva-vazão desenvolvido pelo USACE (*US Army Corps of Engineers*), que realiza simulações não contínuas baseadas em eventos. O usuário pode utilizar diferentes metodologias de hidrogramas unitários sintéticos como o modelo de *Clark*, o modelo de *Snyder*, *SCS-UH* (*Soil Conservation Service - Unit Hydrograph*) e modelo de onda cinemática (*Kinematic Wave Model*). O escoamento superficial pode ser calculado através do *SCS-CN* (*Soil Conservation Service - Curve Number*), através de coeficiente de escoamento superficial ou através do excedente do volume de água que infiltra pela equação de *Green-Ampt*.

## SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* ou SWAT é a convergência e evolução de anos de experiências da USDA (*United States Department of Agriculture*), com outros modelos como o *Basins e Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRB). Este modelo é um complexo modelo físico semi-distribuído projetado para realizar estimativas de água e produção de sedimentos em bacias pouco monitoradas com enfoque na agricultura.

## MGB-IPH

O modelo foi empregado em diversas regiões do Brasil, bem como outros países da América Latina como Paraguai, Bolívia, Peru e Argentina (COLLISCHONN et al., 2007), sendo também aplicado na bacia do Rio Grande para predição de vazão a curto e longo prazo para planejamento operacional de sistemas de geração hidrelétrica, obtendo resultados satisfatórios a curto prazo com erros de 10% a 20% menores que o modelo estocástico atualmente empregado, porém sendo necessários melhorias nos “ensembles” de predição climatológica (TUCCI et al., 2008).

## 4.2 Modelos Hidráulicos

Os modelos hidráulicos geralmente são utilizados para entender o comportamento da propagação de ondas do escoamento em canais abertos para fins de controle de cheias, dimensionamento de estruturas hidráulicas e do impacto de ações mitigadoras nas características hidráulicas do trecho de rio.

Segundo Pender (2006) podemos dividir estes modelos segundo sua dimensionalidade ou a maneira como eles combinam diferentes abordagens de dimensionalidades, sendo elas modelos 1D, 1D+, 2D- e 2D; segundo Néelz e Pender (2009), modelos que utilizam três dimensões a partir das equações 3D *Navier-Stokes* podem ser usadas para calcular perfis 3D da velocidade de canais de rios e planícies de inundação, porém ainda existem desafios práticos a serem resolvidos para que haja aplicação em escala para processos decisórios envolvendo gerenciamento de risco de inundações.

Na Tabela 4 de Pender (2006), estão sumarizados as classificações de modelos hidráulicos segundo o método aplicado, aplicações, escala temporal de dados gerados.

## HEC-RAS

Assim como o HEC-HMS, o HEC-RAS ou *Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System*, foi desenvolvido pelo USACE, este software contém três componentes de análise hidráulica: computação de perfil de superfície de água com fluxo constante; simulação de

fluxo inconstantes; e cálculos de limites móveis de transporte de sedimentos. Os três componentes se utilizam dos mesmos dados de representação geométrica e de mesmas rotinas de computação geométrica e hidráulica.

## SOBEK

É um pacote de software com diversos módulos para diferentes aplicações de modelagem de sistemas hídricos, que foi desenvolvido conjuntamente por consultores particulares e de instituições públicas holandesas (DELTARES, 2014; NOAA, 2007). Os diferentes módulos permitem simular previsão de cheias, otimização de sistemas de drenagem, controle de sistemas de irrigação, dimensionamento de vazões críticas para sistemas de esgoto, controle de nível de água subterrânea, morfologia fluvial, intrusão marinha e qualidade de água superficial. Os módulos podem ser utilizados separadamente ou em conjunto. A transferência de dados entre eles é automática e para facilitar a interação física dos módulos existe a opção de executá-los tanto em sequência quanto em paralelo.

Asselman e Heynert (2003) realizaram um estudo das consequências das cheias na região da Holanda Central através da simulação hidráulica bidimensional. Foram estimados os níveis de água e velocidades geradas pelo rompimento de um dique próximo a Rotterdam e da proteção costeira próxima a Katwijk. Entre os resultados gerados pelo modelo estão os níveis e velocidades da água, assim como o tempo para ocorrência da inundação após o evento. As simulações indicaram que as consequências mais severas aconteceriam com o rompimento do dique, situação em que o nível de água varia entre 6 metros na região central e menos de 1 metro nas bordas da área inundada. As velocidades máximas encontradas foram em torno de 7 m/s próximo à área rompida no dique, diminuindo para 0,1 m/s nas bordas da área inundada. A inundação da área principal estudada aconteceu rapidamente, em torno de 5 horas, enquanto que nas regiões mais distantes o tempo decorrido para inundação foi de 5 dias.

Os métodos desenvolvidos e apresentados em ASSELMAN; HEYNERT, op. cit. para quantificar as consequências das cheias consideraram as perdas econômicas diretas e indiretas, danos para a agricultura e meio ambiente, colapso de construções e da infraestrutura, além de perdas humanas. Todos esses métodos necessitam de informações sobre a extensão das enchentes, níveis e velocidade da água. Para isso, sabendo-se da escassez dos dados de enchentes passadas nessa região, houve a necessidade de realização de simulações, para as quais, foi adotado o modelo hidráulico SOBEK, mais precisamente os módulos *Overland Flow* e *Channel Flow*. Os autores concluíram que em ambos os casos, a propagação da onda de cheia ocorre rapidamente em uma grande área próxima do local de rompimento, minimizando a possibilidade de alertas para a população.

As maiores vantagens da combinação de domínios 1d e 2D segundo Asselman e Heynert

(2003) são:

- Os passos de tempo adotados num grid 2D podem ser significativamente maiores, já que não são necessários refinamentos no grid para a correta representação de estruturas hidráulicas e ravinas;
- Como resultado, as simulações despendem menor quantidade de tempo para execução atingindo um nível comparável de acurácia nos resultados;
- Uma grande variedade de estruturas hidráulicas pode ser considerada;
- Robustez e acurácia.

Em um estudo realizado por Mashriqui, Halgren e Reed (2014), o módulo hidráulico unidimensional foi estendido até a região de marés do estuário do rio Potomac, Estados Unidos. Inicialmente, os autores utilizaram o modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center River Analysis System*) e avaliaram os pontos positivos e as limitações da implementação em regime não permanente. Como uma das limitações identificadas, o modelo não representa de maneira adequada eventos gerados por forçantes de ventos devido à falta de um termo explícito de forçante de ventos. Por isso, para entender a significância dos ventos na hidráulica na zona de transição em Potomac, foram implementados os modelos SOBEK 1D (DELTA RES, 2014) e ADCIRC 2D sigla para *ADvanced CIRculation* (WESTERINK et al., 1992) que incluem os termos de forçante explícita para os ventos.

Os resultados foram comparados com os gerados pelo HEC-RAS para o furacão Isabel. Para isso, foi utilizado o módulo SOBEK-Rural 1D-FLOW, e a implementação foi realizada através da importação do modelo HEC-RAS para o pacote do SOBEK. O modelo foi executado com diferentes cenários a fim de verificar sua influência no erro dos valores de níveis gerados pelo modelo 1D. Os resultados das simulações incluindo ventos mostraram que os picos observados puderam ser atingidos uma vez que o fator de redução de vento foi calibrado. Entretanto, os resultados do modelo não reduziram significativamente o erro de defasagem no tempo de ocorrência do pico no evento do furacão Isabel. Os autores também salientaram a necessidade de mais estudos de pesquisa para a orientação a aplicação operacional da dragagem pelo alto grau de incerteza gerado pela calibração do fator de redução do vento apenas para um evento. Dada a baixa demanda computacional requerida pelos modelos unidimensionais, se torna mais simples a realização da calibração de parâmetros de vento utilizando séries temporais de longo período.

Tarekegn et al. (2010) realizaram um estudo com os objetivos de analisar a representatividade dos resultados da modelagem hidrodinâmica 2D gerados como uso de um modelo digital do terreno ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) com

15 metros de resolução, bem como, analisar a efetividade da modelagem hidrodinâmica 2D para simulação de eventos de cheia intensa em uma região de estudo complexa. A região estudada contempla a bacia do lago Tana, que alimenta o rio Nilo Azul, ao norte da Etiópia. Para tal, foi adotado o módulo *2D Flood Inundation* do modelo SOBEK 1D2D. Com a modelagem foi possível estudar as características das enchentes geradas por vazões do rio Reb e o efeito de remanso induzido pelos elevados níveis de água no Lago Tana. Essa região é caracterizada pela escassez de dados disponíveis. Assim, foi necessário realizar um procedimento de GIS para a reconstrução do terreno do rio e da batimetria do canal utilizando imagens ASTER.

Os resultados de extensão das enchentes gerados pelo modelo e apresentados em Tarekegn et al. (2010), foram comparados com imagens do sensor MODIS (*Resolution Imaging Spectroradiometer*) e com observações históricas espacialmente distribuídas da extensão da planície de inundação. Os resultados gerados pelo modelo mostraram que a morfologia do terreno do rio afeta fortemente as características da vazão simulada. Os autores concluíram que o modelo digital de terreno ASTER com resolução de 15 m pode servir como entrada para a realização de modelagem hidrodinâmica detalhada em regiões com escassez de dados. Contudo é necessária a detalhada reconstrução da geometria do terreno do rio e da topografia da planície de alagamento baseada em observações de campo.

Twigt et al. (2009) realizou o acoplamento online dos softwares DEFLT3D, para a simulação tridimensional de águas costeiras, e do SOBEK para a simulação unidimensional da hidráulica de canais. A modelagem tridimensional simula a vazão com forçantes externas periódicas devido às marés e a distribuição de salinidade tanto para as estações secas quanto úmidas. Assim, os componentes 1D e 3D são acoplados online, o que implica que serão executados em paralelo. Comparando com o acoplamento *off-line*, em que os componentes são executados sequencialmente, o online permite o fluxo de informações em dois sentidos assim como do *feedback* e da interação entre os modelos.

Observou-se em Twigt et al. (2009), que a conservação de massa apresentou grande valor, tanto na hidrodinâmica quanto nas aplicações de qualidade de água, representando com acurácia o transporte de substâncias de montante para jusante no sistema. Uma desvantagem do acoplamento dos componentes 1D e 3D é a inviabilidade de resolver variações espaciais complexas de fluxo. Os autores aplicaram o acoplamento no delta do rio das Pérolas (rio Zhu Jiang), na província de Guangdong no sul da República Popular da China, determinado pela interação entre o rio e o mar do sul da China. Os modelos foram calibrados e validados, tendo sido encontrados valores de erro da raiz média quadrática (RMS) inferiores a 6% para os níveis de água em todo o delta do rio das Pérolas. Os autores também verificaram que os modelos simularam tanto as descargas como os processos de transporte de salinidade com boa precisão.

Ji, Vriend e Hu (2003) realizou a aplicação e validação do modelo SOBEK 1-D a fim

de estudar a redeposição de sedimentos num experimento protótipo de dragagem executado no estuário do rio Amarelo, na China, a fim de estudar o problema de assoreamento. Foi adotado, para solução do problema, um modelo numérico, modelo físico e análise de dados de campo, e os resultados gerados foram comparados. A análise dos resultados indicou que o modelo SOBEK apresenta forte adaptabilidade, podendo ser aplicado ao ambiente estuarino de maneira satisfatória.

## RTC-Tools

O RTC-Tools ou *Real-Time Control Tools*, começou a ser desenvolvido em 2007 como resultado da experiência em projetos de sistemas de previsão e controle de cheias feitos em diversas regiões do mundo como Áustria, Alemanha e Paquistão e seu desenvolvimento continuou durante 2008 e 2010 com implementação de módulos hidráulicos, modelo adjunto para MPC e de controladores (SCHWANENBERG, 2013). A partir de 2012, tornou-se um *software* de código-aberto.

Dentre as aplicações do modelo podemos destacar Schwanenberg e Patzke (2008) com um estudo no rio Reno na região fronteira entre França, Alemanha e Suíça, onde foram testados as potencialidades do RTC-Tools como módulo de controle em tempo real dentro do SOBEK; Schwanenberg, Verhoeven e Boogaard (2010) em um estudo de aplicação de otimização de processos não-lineares; Schwanenberg et al. (2012) em um estudo de controle de níveis de um conjunto polders na Holanda para economizar gasto energéticos; Schwanenberg et al. (2013) em um estudo de aplicação de controle de operação de reservatórios para curto-horizonte de previsão de tempo na UHE de queimados; Kuwajima et al. (2014) que compara diferentes configurações aplicadas para previsão de propagação de onda de cheias e Rodríguez (2013) onde ele compara controle real de operação com regras de operação fixas para reservatórios de múltiplos usos.

## 4.3 Sistemas de Suporte à Decisão (SSD)

Mais da metade da população do planeta vive em regiões costeiras, deltas e próximas às margens de rios. Estas regiões estão economicamente favorecidas por causa do solo rico e fértil e proximidade do mar ou hidrovias. Entretanto, o aumento do nível dos rios e do mar, alterações climáticas e a pressão crescente na infraestrutura dessas regiões têm levado ao crescente risco de alagamentos, deslizamentos e contaminação da água, especialmente nas regiões de menores altitudes e relevos mais planos. (KUMMU et al., 2011)

Assim, agências de gestão das águas e autoridades ao redor do mundo têm buscado utilizar sistemas automatizados e modelos a fim de realizar a gestão dos riscos de alagamento. Dessa forma, grande quantidade de dados, meteorológicos e hidráulicos tem sido combinada e processada para produzir subsídios para alerta de alagamentos e auxílio na tomada de decisões.

Esta combinação e processamento têm culminado na criação de modernos sistemas de previsão de vazões e de alerta (KNIGHT; SHAMSELDIN, 2005). O sistema de operação de reservatórios se constitui em uma das aplicações deste tipo de sistema.

De maneira geral os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) são sistemas de informações com ferramentas avançadas para auxiliar no processo de tomada de decisões. As pesquisas sobre esses sistemas de informação têm recebido cada vez mais atenção devido ao crescente avanço da computação pessoal e da tecnologia da informação.

Segundo (KEEN; MORTON, 1978), o conceito de Sistemas de Suporte à Decisão teve início a partir das pesquisas realizadas no Instituto de Tecnologia de Carnegie sobre tomadas de decisões em organizações, entre o fim da década de 50 e início da década de 60, e os trabalhos sobre sistemas computacionais interativos desenvolvidos no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, em 1960.

(PARKER; AL-UTAIBI, 1986) levantaram 350 artigos sobre SSD desde 1970. Os autores relatam que 77,3% desses artigos foram publicados entre 1980 e 1983 e que o desenvolvimento desses sistemas era visto com muita crítica. Nesse trabalho os autores enfatizam algumas características que esses sistemas devem possuir, como por exemplo: o uso combinado de modelos e técnicas analíticas; facilidade de uso por parte de usuários não especializados; auxílio e aperfeiçoamento da análise humana sem tentar substituir a análise feita pelo usuário; entre outros.

Sobre a história da tecnologia dos SSDs, (RUSSELL et al., 2001) acreditam que essas ferramentas já estão disponíveis desde a criação dos computadores. No entanto, os SSDs permaneceram por muito tempo reservados para usos militares. Com o tempo esses sistemas começaram a ser utilizados por grandes empresas e só depois é que começaram a ser testados na área ambiental. Porém, os SSDs permaneceram por muito tempo sem destaque nessa área, uma vez que as estratégias políticas adotadas nos Estados Unidos não consideravam vital a integração dos modelos econômicos e ambientais. Os autores citam que os primeiros trabalhos a respeito do assunto foram realizados antes de 1972 e que um dos antecessores dos SSDs foi o modelo *Delaware* para estuários, que tinha como objetivo resolver conflitos de usos múltiplos da água.

A definição clássica apresentada por (SPRAGUE; CARLSON, 1982) é que um SSD é "um sistema computacional interativo que ajuda os tomadores de decisão a utilizar informações e modelos para resolver problemas complexos ainda não estruturados". Um SSD integra os seguintes subsistemas:

- I. base de modelos,

II. banco de dados e

III. módulo de diálogo para a comunicação entre usuário e sistema.

(FINLAY, 1994) define SSD como um sistema baseado em computação que serve de auxílio no processo decisório. Já (TURBAN, 1995) define como um sistema computadorizado e interativo de informações, apresentando flexibilidade e adaptabilidade, já que é especialmente desenvolvido para auxiliar a solução de problemas não estruturados e assim aperfeiçoar a tomada de decisão. Esse sistema utiliza informações e dados através de uma interface fácil de usar e permite que o usuário tire suas próprias conclusões. Outras definições são apresentadas por (KEEN; MORTON, 1978) que definem SSD como ferramentas de auxílio baseadas em computadores para tomadores de decisão que estão envolvidos com problemas semiestruturados.

Sobre a classificação de SSD também não existe consenso na literatura. Cada autor tem sua própria classificação. Apesar de haver diferentes ideias quanto à definição, classificação e estrutura dos SSDs, os especialistas concordam que essas ferramentas são essenciais para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Esses sistemas permitem análises técnicas importantes e ajudam a definir políticas sustentáveis para cada região, levando em consideração não só fatores ambientais, mas também fatores sociais e econômicos. (LABADIE; SULLIVAN, 1986) consideram que estes sistemas constituem metodologia apropriada para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

Para (HÄTTENSCHWILER, 2001), um SSD pode ser classificado em passivo, ativo e cooperativo. Um SSD passivo é aquele que pode auxiliar o processo de tomada de decisão, mas não mostra soluções explícitas para os problemas. Já um SSD ativo apresenta soluções e sugestões para os problemas. Um SSD cooperativo é um sistema que permite ao tomador de decisão modificar, completar ou refinar as soluções apresentadas pelo sistema e depois utilizar o SSD para analisá-las novamente até que um consenso sobre as respostas seja obtido. Já (POWER, 2002) classifica os SSD como sendo: baseados na comunicação, baseados em dados, baseados em documentos, baseados no conhecimento e baseados em modelos. Um SSD dirigido a modelos enfatiza o acesso e a manipulação de modelos estatísticos, financeiros, de otimização e de simulação. Esse tipo de SSD utiliza de dados e parâmetros fornecidos pelo usuário para auxiliar o processo de tomada de decisão.

Ainda sobre a estrutura, os SSDs podem tanto ter uma estrutura personalizada para cada cliente quanto ser genéricos, o que significa que não é necessário reprogramar o SSD para que o mesmo seja utilizado por outros usuários. (DENZER, 2005) acredita que a segunda abordagem é mais efetiva em longo prazo apesar de ser muito mais complexa. Ele também concorda que em curto prazo é muito difícil construir um SSD integrado com várias metodologias de maneira



genérica. E isso acontece, pois as ferramentas computacionais disponíveis atualmente não são satisfatórias para realizar esse trabalho.

#### 4.3.1 Sistemas de Previsão de Cheia e de Alerta

O sistema de operação de um reservatório requer a tomada de uma série de decisões que determinam o processo de acumulação e vertimento ao longo do tempo (FABER; STEDINGER, 2001). A operação dos diversos reservatórios brasileiros apresenta ainda uma parcela extra de complexidade, pois muitos deles não estão limitados à geração de energia apenas. Atividades paralelas como controle de cheias, navegação, irrigação, saneamento e restrições quanto a níveis de jusante e montante figuram como balizadores dos processos decisórios envolvidos nas operações (FRANCO, 1993). Além disso, existem muitos casos de usinas hidrelétricas que operem cascata, o que geralmente implica que a descarga de montante é uma porção significativa de sua afluência.

Dentre estes balizadores relacionados ao sistema de operação do reservatório, um dos mais importantes é o foco no controle de cheias, o que se torna um dificultador dentro deste processo, visto que, a hidrologia de enchentes está intimamente ligada às características de tempo, clima e fisiografia da região em questão (TARIQ; GIESEN, 2012).

O processo decisório na operação de reservatórios tem se tornado mais desafiador pela variabilidade natural das vazões dos rios, num mesmo ano e ao longo dos anos, bem como, pelas mudanças associadas ao aquecimento global. Além disto, tem aumentado a exigência do poder público e da própria sociedade para que os usos múltiplos sejam atendidos e contemplados dentro do plano gerenciamento dos recursos hídricos.

#### Operação de Reservatório com Foco no Controle de Cheia

Conforme visto na seção 3.3, a operação de hidroelétrica é geralmente baseada em políticas e regras operacionais definidas e decididas no planejamento estratégico. No Brasil este conjunto de ferramentas geralmente não contempla o controle operacional em tempo real.

A operação em tempo real de um reservatório é um processo de tomada de decisão e monitoramento contínuo, a fim de controlar o nível de água do reservatório e volume de água vertido dele (vazões de saída).

A operação de reservatórios devem ser planejada e executada de forma atender os usos múltiplos de reservatórios, obedecendo todas as restrições de sua utilização da melhor maneira possível. Entre os usos mais comuns podemos citar a produção de energia, abastecimento de água à população, irrigação, pesca, lazer e transporte aquático. Dentre as Restrições citamos as condicionantes ambientais (vazões mínimas a jusante do reservatório), condicionantes de

emergência (vazões máximas a jusante para evitar ou amenizar as inundações) e condicionantes físicas (valores mínimos e máximos de cotas e vazões em função das estruturas hidráulicas existentes).

Todas estas condicionantes (usos e restrições) podem ser expressas na Função objetivo. A Função Objetivo varia com cada caso conforme as prioridades a serem assumidas entre as diversas condicionantes do problema. Em geral a Função Objetivo é um somatório de diversos fatores ao longo do tempo de operação do reservatório. A otimização da operação do reservatório é a maximização ou minimização da Função Objetivo obedecendo às restrições ambientais e emergenciais. Estas restrições podem estar inseridas na Função Objetivo, entretanto geralmente são tratadas separadamente como Restrições às soluções da otimização da Função Objetivo. Estas restrições são representadas por inequações.

A solução da otimização da função objetivo passa pelo balanço hídrico do reservatório e pela simulação de sua operação ao longo de um tempo. Se envolver mais de um reservatório os cálculos são tratados com operações matriciais.

A otimização pode ser resolvida por diversas maneiras entre elas citamos:

- Otimização Estocástica Implícita (ISO);
- Otimização Estocástica explícita (ESO);
- Controle Ótimo;
- Métodos de programação heurística.

Dentre as metodologias não heurísticas (os 3 primeiros tipos na lista acima) citamos a programação linear, programação linear sequencial, programação quadrática sequencial (Lagrangeano projetado), método dos multiplicadores (Lagrangeano aumentado), método generalizado do gradiente reduzido, programação dinâmica. Muitos dos métodos acima são algoritmos estruturados com informações quantitativas e alguns associados a simulações com vazões sintéticas.

Já o Controle Ótimo é uma das técnicas subjacentes à Teoria de Controle, que pode ser definida como uma manipulação matemática de parâmetros que afetam o comportamento de um sistema de maneira a obter um resultado desejado. A Teoria de Controle se baseia no uso de controladores, dispositivos programados para controlar um sistema dinâmico com base em informações coletadas por sensores. Do ponto de vista mais abstrato, controladores são regras de decisão, que no caso do Controle Ótimo, procuram otimizar uma função de custo.

Assim, a teoria do controle pode ser entendida como um caso específico de otimização: os trabalhos clássicos de Yeh (1985) e Labadie (2004) citam a Teoria de Controle como uma das ferramentas adotadas na otimização da operação de reservatórios. De fato, o controle na sua forma discreta apresenta similaridades com as técnicas de programação matemática não linear, em particular com o método do Lagrangeano Aumentado (LABADIE, 2004).

A Teoria do Controle oferece várias técnicas que podem ser utilizadas na operação ótima de reservatórios. No presente trabalho, apresentamos os Modelos de Controle Preditivo ou *Model Predictive Control* (MPCs).

Os métodos de programação heurísticos são baseados em experiências ou analogias diversas, aplicadas à informação quantitativa e qualitativa. Estes métodos procuram soluções aceitáveis ou satisfatórias, mas muitas vezes são capazes de alcançar soluções globais ideais para problemas onde os métodos tradicionais de algoritmos não conseguem convergir ou ficam presos em ótimos locais (LABADIE, 2004).

Dentre as metodologias heurísticas podem ser citadas os Algoritmos Genéticos, as Redes Neurais e a Lógica Difusa (Fuzzy). Os dois primeiros são algoritmos baseados na natureza. Os algoritmos genéticos se inspiram na seleção ocorrida de geração para geração e as redes neurais no funcionamento do cérebro humano com sua rede de neurônios capaz de aprender. Já a lógica difusa é o tratamento das incertezas através da inferência difusa no qual não existe apenas o valor verdadeiro ou falso, mas também valores intermediários. Com isso é possível não só tratar as incertezas como inferir conceitos qualitativos (vazão alta, média, baixa, etc.) e experiência de operadores.

## OpenMI - Open Modeling Interface

Conforme explicado nas seções 4.2 e 4 existem diversos tipos de modelos que podem ser aplicados para as diferentes áreas da engenharia de recursos hídricos, sendo muito difícil um modelo capaz de integrar todas estas análises. Neste contexto surgem o OpenMI (*Open Modelling Interface*) e o Delft-FEWS, que são interfaces que permitem articular e vincular estes diferentes modelos. Na Figura 8 podemos observar um exemplo de integração de vários tipos de modelos como dados meteorológicos de estações (*Met.Station*), Modelos Chuva-Vazão (RR), Modelos Conceituais do Rio para montante e jusante (*Conceptual River Model*), um modelo distribuído 2D para aquífero (*2D Ground Water Model*) e Modelo Hidrodinâmico do Rio (*Hydrodynamic River Model*).

Gerenciar processos ambientais individualmente nem sempre resulta em decisões sensatas e devido à dificuldade e possivelmente inconveniência de conceber um modelo holístico, torna-se importante ser capaz de modelar processos individuais e de conseguir com que eles con-

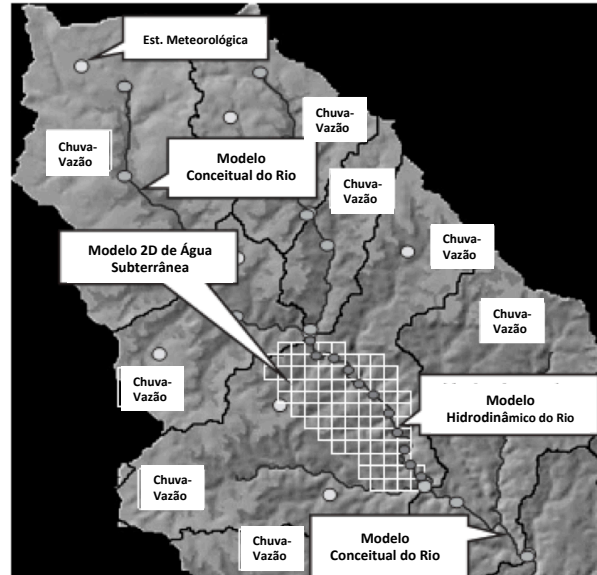


Figura 8 – Exemplo de modelação integrada de bacia hidrográfica utilizando combinação de modelos compatíveis à OpenMI

Fonte: adaptado de Gregersen, Gijbers e Westen (2007)

sigam interagir entre si. Consequentemente, muitos dos modelos hidrológicos de SSD existentes se utilizam de modelos hidrológicos combinados como bloco base de construção (GREGERSEN; GIJSBERS; WESTEN, 2007).

Qualquer sistema pode ser adaptado para necessidades particulares, apresentando maior ou menor facilidade dependendo de sua arquitetura de software. Porém na maioria dos sistemas tal adaptação exige acesso ao código fonte. Na prática isto significa que tal sistema é desenvolvido por fornecedores de modelos utilizando apenas limitados pacotes de modelos, os quais tem seu código fonte aberto. Mesmo quando há grande disponibilidade de pacotes de modelos, o número de combinações disponíveis pode significar que a solução para o projeto em particular não esteja acessível como produto de prateleira, tornando inviável economicamente desenvolver o sistema para um único usuário ou projeto.

O padrão de OpenMI ou (*Open Modeling Interface*) é por definição uma interface de componentes de software. Originalmente este padrão foi projetado para facilitar a simulação

de processos relacionados ao Meio Ambiente que interagem entre si, assim possibilitando que modelos independentes pudessem compartilhar seus bancos de dados, permitindo que fossem executados em paralelo, iterando a cada passo temporal.

Desde então o OpenMI foi expandido e aperfeiçoado para servir como uma solução genérica para este tipo de problema de compartilhamento de dados entre qualquer tipo de modelo, não se restringindo somente aos modelos ambientais, podendo inclusive servir para integrar componentes de software. Atualmente ele é usado para integrar e conectar qualquer combinação de modelos, compartilhar bases de dados e com ferramentas de análise e visualização embutidas.

A integração de aplicativos é uma tarefa complexa principalmente se o objetivo é proporcionar uma interface fácil de usar. Outro assunto é que cada aplicativo pode ter seu próprio banco de dados e que pode ser totalmente diferente dos demais. E isso pode resultar em um controle inadequado sobre os dados para o usuário.

Portanto, atualmente o melhor que pode ser feito é realizar a integração dos módulos de maneira personalizada para cada cliente. Infelizmente isso é o melhor que pode ser feito atualmente. No entanto, existem pesquisas em andamento que prometem soluções mais generalizadas como é o caso da iniciativa OpenMI (BLIND; GREGERSEN, 2005).

Normalmente a integração de diferentes módulos faz com que o usuário tenha que realizar trabalhos de importação e/ou exportação de dados. Isso resulta em uma enorme perda de tempo por parte do usuário, sendo que erros são frequentes nesses processos. Além disso, também resulta em uma grande quantidade de arquivos que podem ser facilmente confundidos pelo usuário. Esse tipo de tarefa pode ser aceitável quando se tratam de especialistas no assunto, no entanto não é aceitável para o usuário comum.

(BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998) também concordam que os SSDs são adequados para auxiliar as atividades de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. Segundo os autores, sistemas complexos e que possuam uma grande quantidade de informações não podem ser mais baseados e enfrentados apenas com a experiência e julgamento das equipes responsáveis. Nesse caso, tornam-se necessários sistemas sofisticados de armazenamento de dados e técnicas de análise desses dados. Os autores enfatizam que apesar da necessidade de técnicas avançadas de análise de dados no processo de tomada de decisão, não se pode esquecer a necessidade de interferência do homem em qualquer fase do processo.

A esse respeito os SSD são ferramentas importantes, pois não tornam a atividade decisória em um processo completamente automatizado e admitem a incorporação de julgamentos dos envolvidos na tomada de decisão.

## Delft-FEWS

Desde sua introdução em 2001/2003, a versão corrente da plataforma do Delft-FEWS foi implementada em mais de 40 centros operacionais (WERNER et al., 2013). A primeira implementação do Delft-FEWS se deu para a bacia do rio Nilo, sendo utilizado pelo Ministério de Irrigação e Recursos Hídricos no Sudão (GRIJSSEN et al., 1992). O mesmo sistema foi adaptado para a região do Punjab, localizado no Paquistão (WERNER; DIJK, 2005).

Os investimentos em pesquisa, desenvolvimento e em melhorias no sistema de previsão de cheias cresceu significativamente na Europa devido às recentes cheias em larga escala ocorridas. Uma das iniciativas tomadas foi o desenvolvimento do sistema europeu de previsão de cheias (*European Flood Forecast System - EFFS*) baseado na plataforma de previsão de cheias do Delft-FEWS. A elaboração desse sistema foi realizada pelo consórcio de 19 institutos de pesquisa europeus, universidades e agências de estado, tendo a WL I Delft Hydraulics como instituição líder. Além disso, segundo Leedal et al. (2013), o mesmo sistema operacional tem sido utilizado pelo Sistema Nacional de Previsão de Cheias do Reino Unido *UK National Flood Forecasting System – NFFS*).

Verwey et al. (2006) apresentaram a potencial aplicabilidade do Delft-FEWS para a bacia do rio Mekong. O trabalho concluiu com a descrição de um número de vantagens específicas relativas ao uso do sistema como uma plataforma de previsão de cheias à bacia em questão. Os autores concluíram na análise que ao se adotar tal sistema, permite-se uma organização das previsões de cheia, ressaltando a vantagem da possibilidade de substituir módulos de softwares livres sem a necessidade de mudar toda a estrutura do sistema de previsão, como seria necessário no caso de uma abordagem centrada no modelo.

Em sistemas de previsão convencionais uma mudança relevante no módulo do software requereria significativa reciclagem da organização no uso do sistema. Esse conceito tem sido reforçado em novas versões do Delft-FEWS, as quais já têm sido utilizadas em mais estudos de caso, tal como o sistema nacional de previsão de cheias para Inglaterra e País de Gales. Atualmente, Delft-FEWS tem sido utilizado em aplicações inéditas, como previsão de secas na Bacia do Rio Vermelho no Vietnã e previsão de intrusão marinha para a lagoa Songkhla na Tailândia.

Werner et al. (2013) discute os princípios nos quais o sistema Delft-FEWS tem sido desenvolvido, e apresenta um apanhado geral da arquitetura do sistema e dos princípios utilizados para o armazenamento e manipulação dos dados. Além disso, os autores discutem o papel dos estudos de previsão de vazões no contexto dos sistemas de alerta de enchente e apresentam algumas aplicações do sistema de previsão Delft-FEWS realizadas na Europa.

A primeira aplicação, na qual o Delft-FEWS atua como espinha dorsal foi na primeira

versão do Sistema Nacional de Previsão de Enchentes do Reino Unido (WERNER et al., op. cit.). Historicamente, as previsões eram realizadas de maneira independente em cada uma das regiões correspondentes à Inglaterra, País de Gales e Escócia. A partir de 2005 tornou-se operacional nestas três regiões. Nos anos de 2006 e 2007 o sistema tornou-se operacional para as demais regiões do Reino Unido. Uma importante característica desta aplicação, o sistema foi inicialmente concebido a fim de integrar sistemas já operacionais nas regiões e assim, garantir a continuidade do serviço independentemente de mudanças no sistema através do qual as previsões eram realizadas. Outra aplicação para previsão de cheias também apresentada em (WERNER et al., op. cit.), que foi realizada pelo Departamento Ambiental Federal da Suíça.

Desde a aplicação deste sistema de previsão nacional foi notável o aumento do número de bacias e rios abrangidos pelos modelos já operacionais (WHITFIELD, 2005 apud WERNER et al., 2013)<sup>1</sup>. Além disso, o uso do Delft-FEWS como sistema integrador permitiu a uniformização dos dados utilizados nas diversas regiões abrangidas pelo estudo, e assim, facilitou a inserção de novos produtos ao sistema, como previsões numéricas do tempo do tipo (*ensemble forecasting*).

Tariq e Giesen (2012) investigaram o comportamento das maiores bacias e da gestão de enchentes a nível nacional no Paquistão. Considerando as três maiores bacias, a bacia do rio Indo tem como principal causa de enchentes as monções, enquanto que ondas do mediterrâneo e ciclones gerados no mar Arábico induzem as cheias na bacia de Kharan e na área costeira de Makran. Assim, desde a criação do país, o governo tem investido muitos recursos em operações de remediação e prevenção de enchentes. O sistema de alerta de cheias no país é de responsabilidade da Divisão de Prevenção de Cheias do Departamento Meteorológico do Paquistão, porém a Autoridade de Desenvolvimento de Água e Energia também contribuem para tal. O sistema de alerta de cheias foi iniciado em 1975, quando a telemetria em tempo real foi instalada em 16 estações fluviométricas e 24 estações pluviométricas. Um consórcio entre o Serviço Nacional de Engenharia do Paquistão e a Deltares realizou a implementação do Sistema de Alerta Antecipado de Enchentes (*Flood Early Warning System – FEWS*).

Weerts, Schellekens e Weiland (2010) mostra as possibilidades oferecidas pelas ferramentas do Delft-FEWS para a manipulação de dados geoespaciais, como valores obtidos por satélites e previsões de tempo e clima. Dois estudos de caso são apresentados pelos autores. No primeiro deles foi elaborado o sistema inédito de previsão de risco de queimadas utilizando dados de nível de água subterrânea. Classes de nível da água podem ser relacionadas à ocorrência de queimadas em turfas, assim, é possível estimar o risco de queimadas nesses ambientes através da aplicação de um modelo de águas subterrâneas que tem como entrada dados medidos ou previstos de precipitação.

---

<sup>1</sup> WHITFIELD, D. The national flood forecasting system (nffs) of the uk environmental agency. In: *International Conference on Innovation and Implementaion of Flood Forecasting Technology*. Tromsø, Norway: [s.n.], 2005.

No segundo estudo de caso apresentado, foi realizada a validação da utilização de dados brutos oriundos de um modelo de circulação geral (*General Circulation Model – GCM*) para estudos hidrológicos. Já é bem conhecido que dados GCM, especialmente precipitação, apresentam grande desvio em relação aos valores observados. Nesse estudo, o Delft-FEWS foi configurado com o intuito de executar os modelos hidrológicos utilizando dados do modelo climático. Os resultados mostraram que os dados de precipitação GCM não podem ser utilizados sem uma prévia correção de erros.

Em Schwanenberg et al. (2013) é apresentado um projeto otimização de reservatório para curto horizonte de previsão de tempo em implantação para UHE de Queimados. O Delft-FEWS é usado como plataforma para integrar modelos chuva-vazão, modelos hidrológicos e modelos hidráulicos.



Tabela 4 – Classificação de modelos hidráulicos segundo a sua dimensionalidade

Método	Descrição	Tipos de Aplicações	Escala temporal de Simulação	Saídas de Dados
1D	Solução das 1-D ESV	Modelagem em escala de projeto na ordem de 10s a 100s de km dependendo do tamanho da bacia	Minutos	Profundidade da água, velocidade média da seção transversal e descarga em cada seção transversal. A extensão da inundação de planícies de inundação se integrar a parte de 1D Modelo, ou através da projeção horizontal do nível da água
1D+	1D mais células de armazenamento para simulação de fluxo na planície de inundação	A modelagem em escala de projeto, que pode ser da ordem de 10s a 100s de km, dependendo do tamanho da bacia, também tem potencial para aplicação em larga escala se usada com dados de seções transversais esparsas	Minutos	Mesmo que os modelos 1D, além dos níveis de água e extensão de inundação em células de armazenamento de volume da planície de inundação
2D-	2D menos a lei de conservação de quantidade de movimento para a planície de inundação	Modelação em larga escala e aplicações onde os efeitos inerciais não são importantes	horas	Extensão da inundação e níveis de água
2D	Solução para as equações bidimensional de canais rasos	Modelagem de escala de projeto da ordem de 10s de km. Pode ter potencial para uso em modelagem em larga escala se aplicada com grades muito grosseiras.	Dias	Extensão da Inundação, Profundidade da água, Profundidade média das velocidades
2d+	2D mais a solução para velocidades verticais usando somente continuidade	Aplicações predominantemente costeiras onde os perfis de velocidade 3D são importantes. Também tem sido aplicado para abordar problemas de modelagem de rios em projetos de pesquisa	Dias	Extensão da Inundação, Profundidade da água e Velocidades em 3 dimensões
3D	Solução das equações tridimensionais de <i>Navier Stokes</i> com aproximação de média de Reynolds	Previsões locais dos campos tridimensionais de velocidade em canais principais e planícies de inundação.	Dias	Extensão da Inundação, Profundidade da água e Velocidades em 3 dimensões

Fonte: Adaptado de Pender (2006).



## 5 Escoamento Hidráulico em Canais

Os processos de escoamento em canais abertos descrevem propagações de ondas ao longo do tempo através de um percurso de um ponto inicial até o ponto final através do comportamento e transformação da distribuição da água neste sistema. Estas mudanças ao longo do tempo (temporal) e ao longo do percurso (espacial) podem ser também extrapoladas para descrever o comportamento das vazões de um rio e assim realizar simulações destes corpos d'água através do emprego de diferentes métodos, que geralmente podem ser categorizados em duas classes: Hidrológico ou hidráulico. O primeiro utiliza tipicamente uma aproximação simplificada para estimar os volumes de armazenamento de um trecho do rio para obter o balanço hidráulico (equação da continuidade), que pode ser definido como:

$$Q = I - \frac{\partial S}{\partial t} \quad (5.1)$$

Onde  $Q$  representa a vazão de saída;  $I$  representa vazão de entrada;  $S$  é capacidade de armazenamento, ou volume de armazenamento; e  $t$  é o tempo.

Um exemplo clássico de um processo de escoamento hidrológico é o método de Muskingum (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Neste método, o volume de armazenamento é aproximadamente a soma de um prisma formado pelo nível da lâmina superficial da água e a superfície do leito do rio e a cunha formada entre a lâmina superficial da do nível da água e linha de energia conforme Figura 9:

O volume armazenado no prisma é proporcional para a vazão de saída, enquanto a cunha pode ser calculada como um volume triangular determinado por um parâmetro de calibração:

$$S_1 = K.O \quad (5.2)$$

$$S_2 = K.X.(I - O) \quad (5.3)$$

Onde  $S$  é o volume de armazenamento;  $K$  é um coeficiente que reflete o armazenamento do prisma em relação ao comprimento;  $X$  um coeficiente que reflete o formato triangular da cunha  $X = 0,5$ .

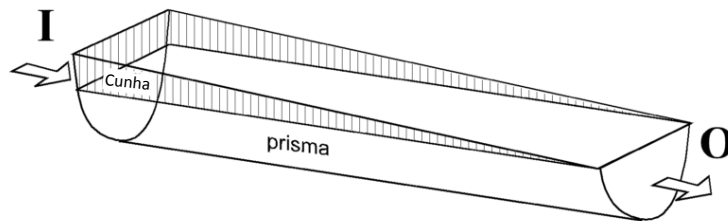


Figura 9 – Representação conceitual do volume de armazenamento para o método de Muskingum

Os valores de  $K$  e  $X$  devem então ser calibrados para cada caso específico de acordo com as características físicas. Porém é importante destacar que estes parâmetros podem mudar de acordo com o tempo e portanto sendo necessário validá-los.

Já os processos hidráulicos envolvem não somente o balanço hídrico e de massa, mas também a lei de conservação de massa para definir um sistema de equações que possa ser utilizado para estimar e quantificar as alterações que ocorrem em relação as vazões de entrada e saída de acordo com as propriedades físicas do trecho de rio. Estas propriedades estão relacionadas a geometria do trecho de rio como as seções transversais do rio, coeficientes de rugosidade, declividade do leito do rio e comprimento das seções do rio.

## 5.1 Equações de Saint-Venant

As equações unidimensionais para fluxo em canais abertos foram formuladas no século IX por dois matemáticos, de *Saint-Venant* e *Bousinnesque*. Elas são utilizadas para simular fluxos em canais abertos que consistem de um sistema de equações que descrevem processos físicos de conservação de quantidade de movimento (momento linear) e massa. (FRANZ; MELCHING, 1997).

Estas equação definem um sistema de equações que foi verticalmente integrados das equações de *Navier-Stokes* mais generalizada, assumindo que as condições de pressão hidroestáticas e relativamente pequena declividades. Para um sistema com condição unidimensional pode-se assumir mais uma simplificação que consiste em integrar a velocidade perpendicular ao

canal. Este sistema resulta na seguintes expressões na forma conservativa (que considera o plano de referência fixo para um elemento infinitesimal):

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) &= (S_0 - S_f) gA \end{aligned} \quad (5.4)$$

A forma não-conservativa onde o plano de referência muda em relação ao fluxo, é expressa da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial t} + V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} &= (S_0 - S_f) g \end{aligned} \quad (5.5)$$

Onde  $A$  representa a área molhada da seção transversal;  $Q$  é a vazão;  $V$  é a velocidade de escoamento;  $\beta$  o coeficiente de *Bousinesq*;  $P$  é a pressão;  $\rho$  a densidade;  $S_0$  declividade do leito do rio;  $S_f$  declividade da linha de energia;  $g$  constante da gravidade;  $y$  é a profundidade da lâmina da água;  $x$  dimensão espacial e  $t$  é o tempo.

A solução destes sistemas de equações resulta em informações do escoamento em termos de área e vazão para a forma conservativa e de nível de água e velocidade para a forma não-conservativa. É importante observar que os coeficientes de rugosidade são consideradas implicitamente na computação dos termos de fricção em cada caso. Isto é um parâmetro altamente sensível que necessita ser calibrado, em comparação aos fatores  $K$  e  $X$  do método Muskingum explicado anteriormente

## Representação Numérica

O escoamento hidráulico pode ser analiticamente resolvido em alguns casos muito específicos somente quando alguns termos da equação da conservação de movimento podem ser desconsiderados (KAZEZYI LMAZ-ALHAN; MEDINA, 2007). Além disso para definições mais complexas das equações diferenciais requerem uso de métodos numéricos para aproximar a solução exata do sistema. Dentre estes métodos de diferenças finitas, onde as derivadas são aproximadas de acordo com o domínio discretizado através de uma expansão de Taylor. Assim desta forma a primeira derivada pode ser substituída por:

$$\left( \frac{\partial y}{\partial x} \right)_{i,n} = \begin{cases} \frac{y_{i+1}^k - y_i^k}{\Delta x} + O(\Delta x) & \text{Operador de Diferença Anterior} \\ \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{\Delta x} + O(\Delta x) & \text{Operador de Diferença Posterior} \\ \frac{y_{i+1}^k - y_{i-1}^k}{\Delta x} + O(\Delta x)^2 & \text{Operador de Diferença Central} \end{cases} \quad (5.6)$$

Onde  $i$  é o índice do ponto discreto onde a derivada está sendo calculada;  $k$  é a escala temporal no qual a derivada está sendo calculada;  $y, x$  são as variáveis dependentes e independentes da equação diferencial.

No sistema de equações 5.6,  $y$  e  $x$  são usadas como variáveis dependentes e independentes e não restritas à altura da lâmina de água ou ao comprimento que normalmente estão associadas. Assim o mesmo pode ser aplicado para a derivada da vazão em relação ao espaço ao velocidade em relação ao tempo. Porém é importante destacar que estas expressões estão representadas em termos do atual espaço de tempo  $k$ , o qual induz a um de esquema explícito. A figura 10 representa as discretizações anteriores em uma grade na qual o eixo horizontal representa o espaço e o eixo vertical representa o tempo.

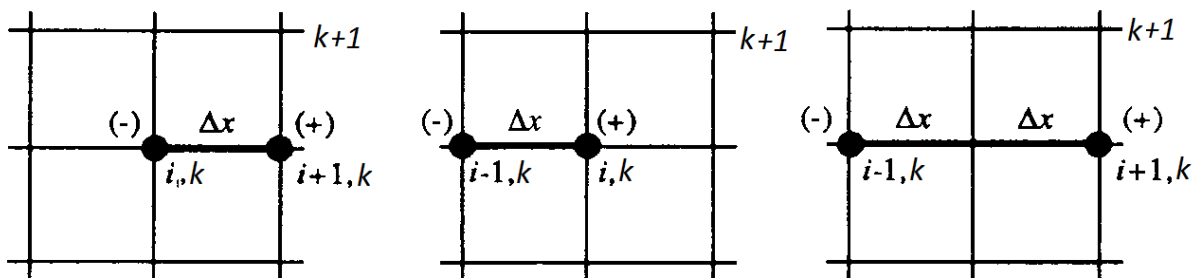


Figura 10 – Representação de discretizações em grade para Operadores de Diferença posterior, anterior e central (eixo horizontal representa espaço e o vertical o tempo)

Fonte: adaptado de Anderson (1995)

Para cada derivada espacial para o ponto  $(i, k)$  são aproximadas a partir da informação do espaço de tempo  $k$ . Em um esquema implícito, a derivada são aproximadas considerando informação da espaço de tempo  $k + 1$ . Assim desta forma para qualquer ponto existem pelo menos duas incógnitas, e portanto o sistema de equações deve ser definido e resolvido. O esquema  $\theta$  por exemplo define um peso para ponderar a importância para derivadas no espaço de tempo  $n$  e  $k + 1$  conforme a seguinte equação:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = (1 - \theta) \frac{y_{i+1}^{k+1} - y_i^{k+1}}{\Delta x} + \theta \frac{y_{i+1}^k - y_i^k}{\Delta x} \quad (5.7)$$

Conforme descrito acima, há uma variável desconhecida adicional de  $y$  na célula vizinha à  $i + 1$  para o espaço de tempo  $k + 1$ , que deve ser resolvido a partir do sistema de equações. O esquema de *Crank Nicholson*, por exemplo, corresponde a um caso particular de  $\theta = 0,5$ , que considera não apenas a aproximação da derivada no espaço de tempo  $k$ , mas também em  $k + 1$ , como mostrado na figura a seguir (ANDERSON, 1995).

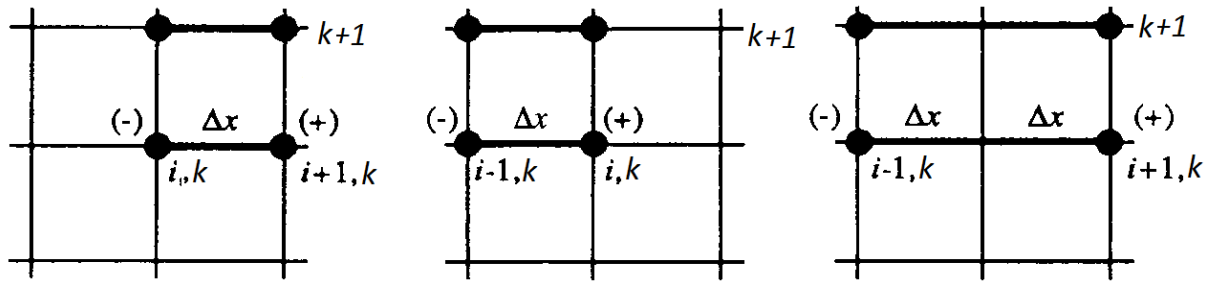


Figura 11 – Representação de um esquema de discretização *Crank Nicholson*

Fonte: adaptado de Anderson (1995)

## 5.2 Comparação entre abordagem Implícita Explícita

Segundo Anderson (1995) as vantagens de uma abordagem explícita seria a facilidade de configurar e formular o problema, mas as desvantagens estaria que pra um conjunto dado de  $\Delta x$ ,  $\Delta t$ , devem estar contidos dentro das restrições de estabilidade, sendo que em alguns casos deverá reduzir bastante o  $\Delta t$  para manter esta estabilidade; resultando em tempos de processamento altos para realizar os cálculos para um intervalo de tempo  $t$ . Já para a abordagem implícita, as vantagens seriam que a estabilidade pode ser obtida para valores muito maiores de  $\Delta t$ , e desta forma utilizando menos espaços de tempo para realizar os cálculos para um intervalo  $t$ , o que implica diretamente em menos custo computacional. Porém esta vantagem vem com algumas desvantagens: o problema é mais complicado de ser configurado e formulado; já que é necessário realizar grandes cálculos matriciais para cada espaço de tempo, o custo computacional relativo, ou seja tempo de cálculo por espaço de tempo é muito maior do que para a abordagem explícita; e já que grande  $\Delta t$  pode ser considerado, o erro de truncamento e a utilização do método implícito para transientes exatos (variações temporais de uma variável independente) talvez não seja tão preciso quanto o método explícito. Porém para soluções dependentes do tempo no qual o espaço de estados é o resultado desejado, esta imprecisão relativa ao tempo não é relevante.

Em Fortuna (2012) a maior diferença entre métodos explícito de implícitos seria que em métodos explícitos utilizam equações independentes, permitindo solução direta, enquanto que os métodos que utilizam a discretização temporal implícita é necessário solução de um sistema de equação para cada unidade de tempo.

## 5.3 Dedução das Equações 1D de Saint-Venant

Os escoamento em rios e canais são descritos por equações diferenciais parciais não-lineares. As leis básicas da mecânica, as quais servem de base para os estudos relativos aos transientes hidráulicos em escoamentos livres, são a equação da continuidade (conservação de massa) e a equação dinâmica (quantidade de movimento) (HENDERSON, 1966). O trata-

mento matemático das ondas de translação também é feita através de equações deduzidas a partir das equações da continuidade e conservação da quantidade de movimento com características complexas. O escoamento livre de um canal pode ser considerado não-permanente ou variável, quando os valores das características do fluido como a profundidade da lâmina de água e outros parâmetros hidráulicos se alteram ou apresentam variação com o tempo. O escoamento não-permanente é geralmente não-uniforme ou variado, sendo que a não uniformidade se caracteriza pelo não-parallelismo das linhas de corrente ao longo do escoamento (PORTO, 1999).

As relações obtidas são decorrentes da consideração de um conjunto de hipóteses simplificadoras como: escoamento unidimensional, distribuição de pressão hidroestática, canal de baixa declividade, canal prismático (seção reta e declividade de fundo constantes em toda a extensão), fluido incompressível com vazão e perda de carga no regime variável computada por uma equação de resistência do regime permanente e uniforme (PORTO, 1999).

Estas equações de fluxo não permanente em canais abertos formam os principais conceitos e hipóteses utilizadas na modelagem matemática de problemas de fluxo de fluidos. Considerando apenas as forças de fluxo mais importantes e dependendo da finalidade da modelagem omitindo aquelas forças que podem ser desprezadas. Desta forma, eles fornecem um modelo simples para fenômenos muito complexos.

Considerando uma seção de um canal aberta hipotética conforme a Figura 12, onde  $Q_i$  é a vazão de entrada,  $Q_f$  é a vazão de saída,  $Z$  é a Elevação ou cota da superfície acima do *Datum*,  $h$  é a profundidade da lâmina de água na seção,  $\Delta x$  é o comprimento da seção e que  $\Phi$  é o ângulo da declividade do canal.

Em sua forma unidimensional, assumindo densidade e temperatura constantes, podemos formular o escoamento em canais utilizando as Equação da Continuidade, que é baseada na lei de conservação de massa e a Equação de Conservação de Movimento, derivada da segunda lei de Newton (ALDRIGHETTI, 2007).

Assumindo que :

- a) O Fluxo é unidimensional, ou seja a velocidade é uniforme através dos transectos e o nível de água, pode ser descrito por uma linha horizontal;
- b) A curvatura das linhas de corrente é pequena e as acelerações verticais são insignificantes, de modo que a pressão se mantém hidroestática;
- c) Os efeitos da fricção e turbulência podem ser representados através da lei de resistência análoga às usadas para fluxos permanentes;
- d) a declividade média do leito do rio é desprezível, de modo que o cosseno do ângulo que ele forma com a linha horizontal pode ser substituído pela unidade;



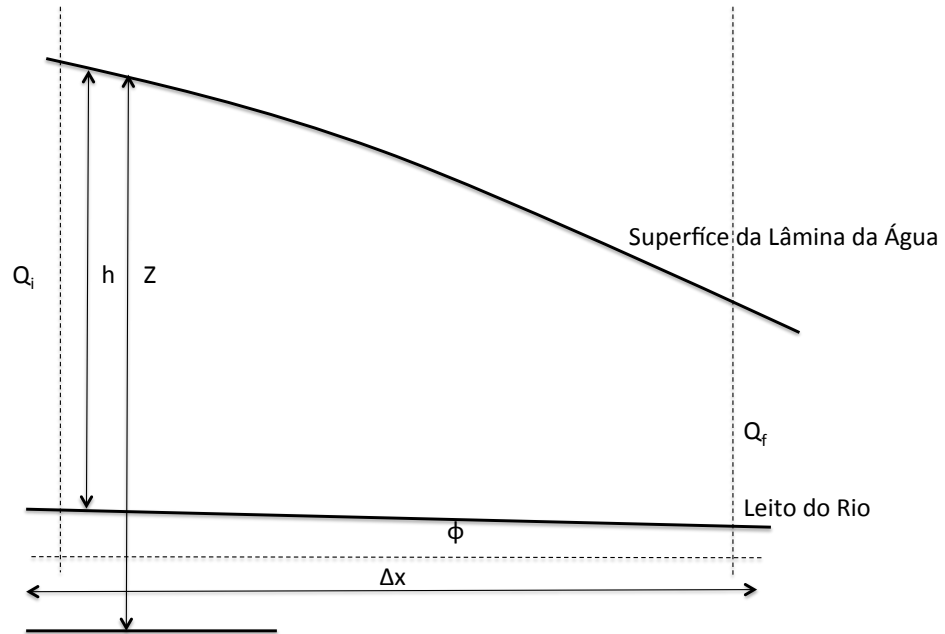


Figura 12 – Representação de uma seção Simplificada de um escoamento de canal aberto

Assumindo que não existem contribuições laterais então temos que:

$$Q_i - Q_f = \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \quad (5.8)$$

Onde a derivada parcial define que a vazão não é constante ao longo de  $\Delta x$  e ao longo do tempo  $\Delta t$ . Logo temos que o volume de água entre a seção inicial e seção final aumenta conforme:

$$b \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x \quad (5.9)$$

Onde  $b$  é a largura do topo da lâmina da água na seção e  $v$  é a velocidade do escoamento perpendicular ao fluxo, temos que a área da seção molhada do rio é dada por:

$$A = bh \quad (5.10)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \quad (5.11)$$

Então,

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x + b \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x = 0 \quad (5.12)$$

e

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial(Av)}{\partial x} \quad (5.13)$$

Que resulta na equação da continuidade:

$$v \frac{\partial A}{\partial x} + A \frac{\partial v}{\partial x} + b \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (5.14)$$

Para deduzir a equação de conservação de momento, então aplicando a segunda lei de Newton para nossa representação de canal temos que,  $F$  é força,  $M$  é massa e  $a$  é aceleração:

$$F = M.a$$

$$\rho \Delta x \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\rho \Delta x \left[ v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right] \quad (5.15)$$

Considerando que  $v$  varia tanto no espaço  $x$  quanto no tempo  $t$  e que a aceleração é influenciada pela mudança na pressão estática  $\frac{\partial H}{\partial x}$  e resistência causada pela fricção  $\mu$  nas paredes do canal e pela força da gravidade  $\rho g$  e a inclinação do leito do rio  $\Phi$ :

$$\frac{\partial H}{\partial x} \Delta x \cos \Phi - \mu \Delta x + \rho g A \sin \Phi \quad (5.16)$$

E considerando ângulos para  $\Phi$  pequenos, então temos que:

$$\cos \Phi = 1;$$

$$\sin \Phi = \Phi = S_f \quad (5.17)$$

Então:

$$\frac{\partial H}{\partial x} \Delta x - \mu \Delta x + \rho g A \Delta x S_f \quad (5.18)$$

Agora

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \quad (5.19)$$

e

$$\mu = \rho g A S_0 \quad (5.20)$$

Onde  $S_0$  é a perda de energia por unidade de medida do comprimento do canal por unidade de massa do fluido. Então pode-se reescrever para:

$$\rho A \Delta x \left( v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_0 + \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \quad (5.21)$$

Reescrevendo novamente temos a equação de conservação de momento:

$$g \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} = g(S_f - S_0) \quad (5.22)$$

O escoamento unidimensional pelas equações de Saint-Venant é portanto apresentado por duas equações: A Equação 5.23 representa as propriedades de conservação de massa e a Equação 5.24 representa a conservação de momento ou de momento linear.

Desta forma temos que:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{A \partial V}{B \partial x} + V \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{V}{B_{d=\text{constante}}} = 0 \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial d}{\partial x} + g(S_f - S_0) = 0 \quad (5.24)$$

Onde  $A$  corresponde à área molhada ou fluxo da área transversal,  $B$  é a largura da superfície livre,  $d$  é a profundidade da água, o símbolo  $Y$  representa a elevação da superfície livre ou a profundidade da água mais referência ( $Y = d + Z_0$ ),  $T$  é o tempo,  $x$  corresponde a distância ou espaço de coordenadas na direção do fluxo,  $g$  é a constante gravitacional,  $S_0$  é a inclinação do leito do rio ou a inclinação inferior e  $S_f$  é a inclinação da linha de energia ou de atrito.

As forças de conservação de movimento representadas pela Equação 5.24, podem ser divididas em forças de aceleração local e convectiva, forças de pressão, forças gravitacionais e forças de atrito ou fricção. Na Tabela 5, estão descritos os termos da da equação que compõe a equação de conservação de momento.

$$\underbrace{\frac{\partial V}{\partial t}}_I + V \underbrace{\frac{\partial V}{\partial x}}_II + g \underbrace{\frac{\partial d}{\partial x}}_III + \underbrace{g(S_f - S_0)}_{IV+V} = 0 \quad (5.25)$$

Tabela 5 – Componentes da Equação de Conservação de Movimento.

Componente	Descrição
I	Termo de Aceleração Local
II	Termo de Aceleração Convectiva
III	Termo de Força de Pressão
IV+V	Termo da Força de Gravidade + Termo da Força de Fricção

## 5.4 Simplificações das Equações de Saint-Venant

Em alguns casos simples é possível solucionar analiticamente as ESV integrando equações diferenciais parciais; é possível também solucionar-las através de uma solução numérica por aproximação de diferenças finitas, o que geralmente requer muito processamento computacional. No entanto estas não são as únicas maneiras para solucionar estas equações, negligenciando os termos da equação Equação 5.26 obtém-se equações simplificadas, que são mais fáceis de serem solucionadas e que requerem menos esforço computacional.

Em algumas aplicações, as forças de aceleração (local e convectiva) e as forças de pressão podem ser desconsideradas, pois seus efeitos tem impactos desprezíveis ou não significativos nos processos hidráulicos que estão sendo computados. Na Tabela 6, estão apresentados as simplificações das ESV e as premissas adotadas para cada caso ao de negligenciar termos da equação de conservação de movimento.

$$\overbrace{\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial d}{\partial x} + \underbrace{g(S_f - S_0)}_{\substack{\text{Onda Cinemática} \\ \text{Onda Difusa}}}}^{\text{Eq. Hidrodinâmica}} = 0 \quad (5.26)$$

O modelo de onda cinemática desconsidera todos os termos da equação de conservação de movimento, excetuando as forças gravitacionais e de fricção, enquanto que os modelo de onda difusiva leva em conta também as forças de pressão. O modelo totalmente dinâmico adota

Tabela 6 – Características das Simplificações das Equações de Saint-Venant.

	Onda Hidrodinâmica / Totalmente Dinâmica	Onda Difusa	Onda Cinemática
Termos da Eq. de Conservação de Movimento	I+II+III+IV+V	III+IV+V	IV+V
Inversão de Fluxo & Efeitos de Remanso	Sim	Sim	Não
Atenuação das Ondas de Cheia	Sim	Sim	Não
Aceleração de Fluxo	Sim	Não	Não

os termos de aceleração tanto local quanto convectiva no sistema de equações. Chow, Maidment e Mays (1988) explica que estes termos são importantes para pequenas declividades onde as forças de inércia são relevantes e subcríticos ocorrem a jusante.

Em suma, as expressões simplificadas podem representar com precisão problemas específicos, dependendo da importância e impactos de seus termos para determinadas aplicações (por exemplo, as forças de inércia em estuários, forças gravitacionais em regiões montanhosas, efeitos de remanso em planícies aluviais), com a vantagem de reduzir os custos computacionais (MONTERO et al., 2013):

- a) A simplificação de onda dinâmica são usadas quando as forças inerciais e de pressão são importantes e os efeitos de remanso não podem ser desconsiderados (canais com declividade suave com controle à jusante);
- b) O Modelo Inercial (BATES; HORRIT; FEWTRELL, 2010) negligencia o termo de aceleração e não pode ser utilizado em casos onde as forças de pressão tem papel importante juntamente com as forças gravitacionais e de atrito;
- c) e finalmente na simplificação de onda cinética (LIGHTHILL; WHITMAN, 1955), que reduz a equação de conservação de movimento mantendo somente o termo de atrito ou fricção e forças gravitacionais, sendo aplicável quando as forças de atrito e gravidade compensam uma a outra (Declividade alta e sem efeitos de remanso);



## 6 Modelo de Controle Preditivo - MPC

Em García, Prett e Morari (1989) um MPC (*Model predictive control*) é definido com um conjunto de controladores na qual há uso direto de um modelo explícito e identificável. Controladores baseados no conceito de MPC foram amplamente adotados na indústria (particularmente na indústria petroquímica), em especial devido à capacidade de *designs* baseados em MPCs em fornecer sistemas de controle de alto desempenho, capazes de operar sem supervisão por longos períodos de tempo. O autor também ressalta que ainda que MPCs não sejam inerentemente mais robustos que outros modelos clássicos, o ajuste da robustez de MPCs é mais fácil.

No entanto em Mayne et al. (2000) um MPC é caracterizado como aquele em que a decisão atual de controle é a solução de um problema de controle ótimo do tipo malha aberta (*open loop*) com horizonte finito. Este problema é resolvido a cada intervalo de amostragem do sistema, tal que o estado do sistema é a condição inicial de cada otimização. Esta otimização resulta numa política operativa ótima, da qual a decisão do primeiro período é adotada como a decisão operativa do sistema controlado. A principal vantagem de MPCs é sua capacidade de lidar com restrições rígidas sobre o controle e os estados do sistema.

O MPC é um caso específico da Teoria de Controle Ótimo (TCO). A Teoria do Controle é um estudo matemático para manipular os parâmetros que afetam o comportamento de um sistema a fim de alterar e controlar este sistema para obter o o comportamento e resultado desejado ou ótimo. Isto é, a TCO (e por extensão o MPC) estão associadas a problemas de otimização.

(YEH, 1985; LABADIE, 2004) tratam sobre operação ótima de reservatórios e citem a TCO como uma das técnicas usadas na otimização da operação de reservatórios. De fato, a TCO na sua forma discreta apresenta similaridades com as técnicas de programação matemática não linear, em particular com o método do Lagrangeano Aumentado, também denominado como Método dos Multiplicadores LABADIE, op. cit.. Assim, a adoção de MPCs, uma aplicação particular da TCO, para a operação de reservatórios é uma escolha natural.

A característica mais marcante de MPCs é sua capacidade em representar facilmente restrições rígidas durante o design e implementação do controlador (GARCÍA; PRETT; MORARI, 1989). Esta é a principal razão pela qual MPCs são tão amplamente utilizados na indústria.

Segundo Mayne et al. (2000), uma das características que distingue os MPCs de outros modelos de controle é sua natureza *on-line*, isto é, o modelo calcula uma decisão de controle a cada intervalo de amostragem do sistema. Isto contrasta com outros modelos de controle, que determinam todas as decisões para todos os estados do sistema, e por isso podem ser

resolvidos *off-line*. Assim, a implementação de um MPC recai na modelagem de um problema de Programação Dinâmica, com a restrição de que o tempo computacional deve ser pequeno o suficiente para permitir o controle adequado do sistema.

(MAYNE et al., 2000) também enfatiza a importância que a estabilidade possui na modelagem de MPCs. Como um MPC se resume à resolução sequencial de múltiplos problemas de otimização malha aberta, deve-se prestar atenção à estabilidade das decisões, isto é, a decisão de controle retornada por um MPC deve minimizar as mudanças bruscas no estado do sistema. Os autores concluem que a teoria de estabilidade em MPCs está bem desenvolvida, ainda que maiores contribuições sejam bem vindas no caso de MPCs não lineares. Também são abordados os tópicos como robustez de MPCs (capacidade de absorver perturbações), retroalimentação e restrições suaves (que podem ser violadas eventualmente).

As técnicas mais comuns para controle de estruturas hidráulicas em sistemas de recursos hídricos, como as de barragens, são as regras de operação ou definição de regras de retroalimentação "*off-line*" através de programação dinâmica estocástica. Estas regras servem para definir abertura e lançamentos mínimos de forma garantir os níveis de água ou atenuar cheias e geralmente estão associados a controladores secundários para garantir um valor desejável no local como o caso dos controladores do tipo PID (*Proportional-Integral-Derivative*), também conhecidos como Controladores Proporcional Integral Derivativo, a um grande custo computacional. Estas técnicas funcionam bem em sistemas pequenos, mas conforme a complexidade de operação do sistema aumenta, este tipo de controle pode resultar em um controle sub-ótimo do sistema (SCHWANENBERG; BREUKELEN; HUMMEL, 2011).

Nestes casos onde o sistema é bastante complexo e observa-se alta interligação e interdependência entre os sistemas e/ou não é possível obter uma solução acessível através da programação dinâmica estocástica, aplica-se o MPC ou modelo de controle preditivo, que é um conceito de controle que utiliza modelos de processos para prever trajetórias futuras das variáveis controladas em um horizonte de previsão finito, de forma permitir um conjunto otimizado destas variáveis através de algoritmos de otimização. Uma parte integral deste conceito é a consideração explícita de restrições quanto aos dados de entrada, estados e dados de saída. Algumas considerações devem ser feitas sobre os mesmos SCHWANENBERG; BREUKELEN; HUMMEL, op. cit.

- a) Os sistemas podem incluir componentes altamente não-lineares, em particular os relacionados às estruturas hidráulicas.
- b) Se o controle de armazenamento for uma componente importante no MPC, o conflito entre os objetivos atuais e futuros podem exigir um modelo de previsão preciso sobre o horizonte de controle completo.



- c) Nem sempre existe um conjunto óbvio do sistema que permita linearização da dinâmica do sistema. O regime de vazão pode alterar em seus limites naturais.

A assimilação de dados é um fator fundamental para a implementação na prática destes controles, uma vez que contribui para a identificação do sistema *off-line* de redução de modelos internos de otimização de parâmetros e a assimilação de dados é utilizada na fase de operacional para atualização do modelo através da adaptação de parâmetros, estados ou resultados do modelo interno para melhoria da precisão do ciclo.

A MPC pode sofrer problemas computacionais, especialmente ao abordar problemas de gerenciamento de sistemas de grande escala para horizonte de controle de curto-prazo, que requer sequência de controle otimizada em um curto espaço de tempo. Nestes casos para melhorar a eficiência do MPC devem-se adotar sistemas de controle mais eficientes, mantendo controle centralizado e abordando as não linearidades e perturbações.

Uma série de métodos de controle podem ser utilizados para uma operação mais eficiente sistemas de reservatório; atender as descargas-alvo para otimizar a produção de energia e controlar o nível de água do reservatório, assim mitigar o impactos de inundações. Nesse sentido diferentes abordagens de algoritmos de controle podem ser aplicados: O *feedback* (*FB*, também conhecido como circuito fechado) e *Feedforward* (*FF*, também conhecido como *open-loop*).

Em uma aplicação em Noorderzijlvest no norte dos Países Baixos (SCHWANENBERG et al., 2012) utilizou-se MPC para otimizar um sistema de pôlderes, para controlar enchentes antecipando eventos de chuva através da previsão de vazão, além de reduzir custos de bombeamento utilizando prioritariamente escoamento por gravidade e utilizado eletricidade somente a noite, quando as tarifas são mais baratas. Utilizando modelação adjunta (modelos hidrográficos), horizonte de previsão móvel para atualizar os estados dos modelos hidrológicos para previsão operacional de vazão e MPC, Schwanenberg et al. (2012) otimizou as descargas de um sistema de reservatório de grande escala com custo computacional bastante baixo.

Teoricamente, no *FB* as variáveis são controladas e medidas diretamente, assim qualquer medida de controle e ações corretivas são alimentados de volta ao sistema, resultando em efeitos sobre os valores controlados para atender seus valores-alvo, enquanto que no *FF* os efeitos são medidos ou previstos, a fim de determinar o controle e ações corretivas. Aplicando *FF* permite redução dos efeitos de quaisquer perturbações nas variáveis, controladas, e aplicar o *FF* é mais viável para reduzir as perturbações medidas nos valores-alvo. Na prática, uma vez que é difícil de medir todas as perturbações e prever o seu comportamento, o *FB* pode ser mais eficaz do que o *FF* (SCHUURMANS, 1997).

De acordo com o Malaterre, Rogers e Schuurmans (1998) outras vantagens e desvanta-

gens de cada técnica são: a limitação do FB nos casos em que as ações de controle apresentam atrasos de tempo e limitações do FF quando existem perturbações desconhecidas ou erros de estimativa e modelo. Portanto, ambas as técnicas podem ser aplicadas em conjunto; as grandes perturbações poderiam ser escaladas por FF e o efeito de distúrbios menores reduzidos por FB resultando em um sistema de controle muito preciso.

Outra maneira de resolver o problema de gestão de volumes reservatórios é de prever trajetórias futuras de estado em vez de operar com base em seu status atual e usar essas informações para computar uma estratégia de lançamento ideal em um horizonte de previsão de curto prazo. Esta técnica é referida como uma abordagem *on-line* e conhecida na engenharia de controle como MPC. Com ele é possível incorporar perturbações externas, tais como entradas de reservatório para o modelo de sistema e aplicar explicitamente restrições, por exemplo, para a elevação *forebay* (GARCÍA; PRETT; MORARI, 1989). A técnica recebe cada vez mais atenção para o gerenciamento de sistemas de água e tem sido aplicado por (OVERLOOP, 2006) (BLANCO et al., 2010), (KEARNEY; DOWER; CANTONI, 2011) (DELGODA; N.HALGAMUGE; MALANO, 2013), entre outros.

De acordo com o (MORARI; LEE, 1999), no MPC, estados do sistema futuros são calculados através de modelos internos. A diferença dos estados previstos e os seus pontos de ajuste para cada passo de tempo dentro de um período chamado horizonte de previsão são, então, incorporados em uma função objetiva. Esta função é usada como uma entrada, em conjunto com um conjunto de restrições, para definir um problema de otimização, cuja solução por um algoritmo de otimização representa o sistema de controle ótimo.

O MPC é especialmente útil para sistemas multi-usos e restrições problema desde múltiplas variáveis, por exemplo, níveis de água, descargas e produções hidroelétricas, pode ser facilmente acoplado na função objetivo usando fatores de ponderação que definem a importância de cada termo da otimização, enquanto que as restrições são dadas diretamente como entradas para o otimizador. Isso significa que se pode decidir como serão utilizadas estruturas hidráulicas tais como comportas, barragens e açudes, para diferentes fins, por exemplo, para produzir uma quantidade máxima de energia hidrelétrica, para manter um nível de água desejado no rio, ou para manter uma determinada vazão em um corpo d'água.

Então considerando um sistema de água arbitrário representado por:

$$x^k = f(x^{k-1}, x^k, u^k, d^k) \quad (6.1)$$

$$y^k = g(x^k, u^k, d^k) \quad (6.2)$$

Onde  $x$ ,  $y$ ,  $u$ ,  $d$  são, respectivamente, o estado, variável dependente, controle de variáveis e vetor de perturbação e  $k$  é a notação para o horizonte de tempo. As equações 6.1 e 6.2 são usados para prever trajetórias futuras do estado  $x$  e variável dependente  $y$  em um horizonte de tempo finito representado por  $k = 1, \dots, N$  instantes de tempo, para determinar o melhor conjunto de variáveis de controle  $u$  usando um algoritmo de otimização. Assumindo que os futuros distúrbios que ocorrerão neste sistemas de água ao longo do horizonte de tempo são conhecidos, a formulação de MPC se torna:

$$\min_{u, x^*} \sum_{k=1}^N J(x^k, y^k(x, u), u^k) + E(x^N, y^N(x, u), u^N) \quad (6.3)$$

sujeito à

$$h(x^*(u), y^k(u), y^k(x, u), u^N) \leq 1, \dots, N \quad (6.4)$$

$$x^{*,k} - f(x^{*,k-1}, x^k, u^k, d^k) = 0 \quad (6.5)$$

onde  $J()$  é uma função de custo associada a cada transição de estado,  $E()$  é uma função custo adicional em relação às condições de estado final, e  $h()$  são restrições duras sobre as variáveis de controle e estados, respectivamente. A notação  $x^*$  refere-se a um subconjunto de variáveis de estado que se tornam variáveis de otimização independentes. Neste caso, o modelo de processo relacionado torna-se uma restrição de igualdade do problema de otimização em Equação 6.5 tal qual em uma otimização simultânea ou colocado configuração de otimização (XU; SCHWANENBERG, 2012).

O MPC define controle como um problema de otimização de uma função objetiva com um conjunto de restrições. Que podem ser restrições de desigualdade que limitam o intervalo de valores de controle, ou variáveis de estado ou também como restrições de igualdade que pode ser usadas para definir o modelo interno do sistema. No entanto, essas restrições de igualdade também podem ser implicitamente integradas na execução da função objetivo. Como explicado por (XU; SCHWANENBERG, 2012), os dois tipos de formulações MPC resultam da configuração específica: simultânea e sequencial. A primeira utiliza o modelo interno como uma restrição de igualdade da otimização enquanto o segundo se aplica simulação do modelo para cada iteração passo do otimizador na execução da função objetivo. Para sistemas de reservatório, que a abordagem sequencial é mais rápido do que o simultâneo uma vez que o número de variáveis no otimização é reduzido e a integração do modelo de processo é simples.

Por motivos de desempenho, os otimizadores preferidos dentro do MPC geralmente recebem o gradiente da função objetivo em relação a cada variável de controle, o que reduz o tempo de computação tanto para aplicações simultâneas quanto para sequenciais.

Na abordagem simultânea, o cálculo do gradiente é simples, mas a abordagem sequencial requer diferenciação algorítmica do modelo de simulação através de procedimentos, tais como a diferenciação algorítmica ou, modelos adjuntos baseados na diferenciação algorítmica no modo reverso ou derivados por auxiliar formalismos como os multiplicadores de *Lagrange* (GRIENWANK; WALTHER, 2008).

## 6.1 Diferenças entre MPC sequencial e simultâneo

Para compreender a diferença entre um MPC sequencial de um simultâneo tomemos um exemplo onde consideramos um modelo simples de escoamento de reservatório como o modelo de processo interno. Sua esquematização explícita pode ser representada pela seguinte equação:

$$h^k = h^{k-1} + \frac{\delta t}{A} (I^k - Q^k - f(h^{k-1})) \quad (6.6)$$

Onde  $h$  é o nível de água;  $\delta t$  a escala temporal;  $A$  a área superficial;  $I$  vazão de entrada;  $Q$  vazão controlada de saída;  $f()$  vertimento não controlado.

O vertimento é simulado como uma função de um vertedouro, conforme:

$$f(h^{k-1}) = C.B.(h^{k-1})^{1,5} \quad (6.7)$$

Onde  $C$  é o coeficiente do vertedouro e  $B$  é a largura da estrutura hidráulica

Este processo é sujeito à seguinte restrição  $0 \leq Q \leq Q_{max}$  e a função objetivo a ser otimizada pode ser definida para cada espaço de tempo como:

$$J = W_k(h^k - h_s)^2 + W_q(Q^k - Q^{k-1})^2 \quad (6.8)$$

Onde  $h_s$  é o valor-alvo da altura da lâmina de água (profundidade),  $W_h$  e  $W_q$  correspondem aos termos de ponderação atribuídos à profundidade e vazão.

De um modo mais geral, existe um número  $n$  de termos de ponderação, e é conveniente que o resultado da incorporação deles em conjunto seja ao menos 1 ou que eles tenham um valor

de referência que seja bem pensado para cada caso.

Assumindo que  $h^0$  e  $Q^0$  são dadas como condições iniciais, pode-se otimizar o sistema em dois espaços de tempo, e comparar os diferentes esquemas para MPC.

Um otimizador no qual o gradiente é introduzido pelo usuário é chamado de baseado no gradiente. O otimizador também pode calcular o gradiente da função objetivo e as próprias restrições por diferenciação numérica, embora esse processo seja mais demorado do que a primeira abordagem.

### 6.1.1 MPC Simultâneo

Em uma esquematização simultânea, o modelo interno é resolvido juntamente com a função objetivo pelo otimizador, assim como uma igualdade de restrição do problema de otimização. Portanto, tanto o nível como a liberação devem ser definidos como entradas no otimizador. As seguintes equações são dadas como entradas para o otimizador sob o esquema simultâneo. O modelo interno é geralmente dado por uma relação não linear entre a descarga e a profundidade da água, assim como no seguinte exemplo:

$$\begin{aligned}
 J &= [(h^1 - h_s)^2 + (Q^1 - Q^0)^2] + [(h^2 - h_s)^2 + (Q^2 - Q^1)^2] \\
 C1 : 0 &= h^1 - \left[ h^0 + \frac{\Delta t}{A} (I^1 - Q^1 - C.B(h^0)^{1,5}) \right] \\
 C2 : 0 &= h^2 - \left[ h^1 + \frac{\Delta t}{A} (I^2 - Q^2 - C.B(h^1)^{1,5}) \right] \\
 &\quad 0 \leq Q^1 \leq Q_{max} \\
 &\quad 0 \leq Q^2 \leq Q_{max}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} J \\ C1 \\ C2 \end{aligned}} \right\} \text{Restrições e Modelo Interno} \quad (6.9)$$

Então obtêm-se para este caso um total de 4 variáveis de controle a serem otimizadas, que será denominado vetor  $U$ :  $h^1$ ,  $h^2$ ,  $Q^1$ ,  $Q^2$ . Caso se opte por um otimizador baseado em gradiente, a função objetivo e o gradiente de restrições das funções em relação a cada variável de controle precisam ser computado e dado como uma entrada adicional do otimizador. Portanto:

$$\frac{\partial J}{\partial U} = [2(h^1 - h_s)2(h^2 - h_s)2(Q^1 - Q^0)2(Q^2 - Q^1)] \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial U} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\Delta t}{A} & 0 \\ -1 + \frac{\Delta t}{A} \cdot C.B.(1,5(h^1)^{0,5}) & 1 & 0 & \frac{\Delta t}{A} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Onde  $C$  corresponde ao vetor de restrições definido no sistema anteriormente. Neste esquema as variáveis de controle são consideradas independentes para cada caso.

### 6.1.2 MPC Sequencial

Em um MPC sequencial, a função objetiva incorpora o modelo interno. então as variáveis de controle são reduzidas para somente duas:  $Q^1$  e  $Q^2$ . As entradas para o otimizador para este caso pode ser formulada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} J &= \left[ (\tilde{h}^1 - h_s)^2 + (Q^1 - Q^0)^2 \right] + \left[ (\tilde{h}^2 - h_s)^2 + (Q^2 - Q^1)^2 \right] \\ 0 &\leq Q^1 \leq Q_{max} \\ 0 &\leq Q^2 \leq Q_{max} \end{aligned} \quad (6.12)$$

Desta forma pode-se definir o modelo dentro da função objetivo para calcular os valores correspondentes de  $\tilde{h}^1$  e  $\tilde{h}^2$ . Então assim função objetivo é redefinida como:

$$\begin{aligned} j &= \left[ (v - h_s)^2 + (Q^1 - Q^0)^2 \right] + \\ &\left( \left( v + \frac{\Delta t}{A} (I^2 - Q^2 - C.B. (v^{1,5}) - h_s)^2 \right)^2 + (Q^2 - Q^1)^2 \right); \\ \text{onde :} \\ v &= h^0 + \frac{\Delta t}{A} (I^1 - Q^1 - C.B. (h^0)^{1,5}) \end{aligned} \quad (6.13)$$

Então como pode-se observar, através do MPC sequencial é possível reduzir o número de variáveis a serem otimizadas e que esta técnica se concentra apenas nas variáveis de controle, não havendo desta forma a necessidade de realizar iterações sobre as variáveis de estado (profundidades de água neste exemplo). De forma similar ao MPC simultâneo, um esquema baseado em gradiente pode ser introduzido fornecendo o gradiente da função objetivo em relação às variáveis de controle. Tais equações são descritas abaixo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial Q^1} &= 2(h^1 - h_s) \frac{\partial h^1}{\partial Q^1} + 2(Q^1 - Q^0) + 2(h^2 - h_s) \frac{\partial h^2}{\partial Q^1} + 2(Q^2 - Q^1) \\ \frac{\partial J}{\partial Q^2} &= 2(h^2 - h_s) \frac{\partial h^2}{\partial Q^2} + 2(Q^2 - Q^1) \end{aligned} \quad (6.14)$$

As derivadas da profundidade da água em relação às variáveis de controle se tornam então:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h^1}{\partial Q^1} &= \frac{\Delta t}{A} \\ \frac{\partial h^2}{\partial Q^1} &= \frac{\partial h^2}{\partial h^1} \frac{\partial h^1}{\partial Q^1} = \left( 1 - \frac{\Delta t}{A} \cdot C.B.1,5 (h^1)^{0,5} \right) \frac{-\Delta t}{A} \\ \frac{\partial h^2}{\partial Q^2} &= 0 \\ \frac{\partial h^2}{\partial Q^2} &= \frac{-\Delta t}{A} \end{aligned} \quad (6.15)$$

## 6.2 Aplicação na Operação de Reservatórios

O Sistema Interligado Nacional (SIN), devido à sua complexidade, foi objeto de múltiplos estudos com o intuito de otimizar sua operação. É natural que a aplicação de MPCs à operação de reservatórios tenha precedente no Brasil.

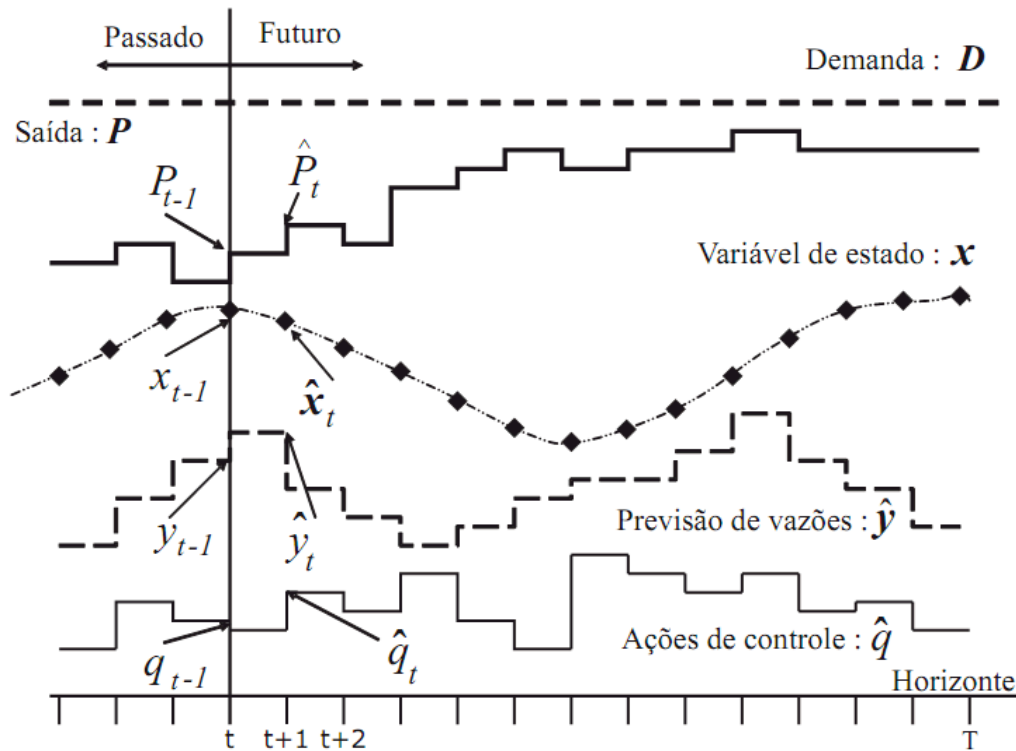
Marques, Cruz e Vinhal (2010) apresenta uma metodologia baseada em MPCs para a otimização do despacho hidrotérmico (hydrothermal scheduling). Esta se baseia nas informações de um previsor de vazões para definir a política operativa ótima do Sistema Interligado Nacional (SIN). Este tipo de problema geralmente é analisado através de programação estocástica, mas neste caso o Controle Preditivo permite considerar a incerteza através de previsões. Isto permite adotar uma modelagem similar à da otimização determinística, evitando as complexidades inerentes aos modelos de otimização estocástica (LABADIE, 2004).

Assim, em conformidade com as premissas dos MPCs, a política operativa é baseada num processo adaptativo de tomada de decisões, onde a cada intervalo de tempo as decisões são tomadas pelo algoritmo de otimização alimentado pelas previsões de aflúncias futuras. O procedimento de previsão/otimização é repetido a cada intervalo do horizonte de planejamento visando minimizar os desvios na trajetória ótima dos reservatórios provocados pelos erros entre os valores previstos e verificados.

Na Figura 13 apresenta as variáveis envolvidas no Controle Preditivo:  $q_t$ ,  $P_t$ ,  $x_t$  e  $y_t$  são definidas respectivamente como variável de controle (vazão turbinada), saída do sistema (geração hidrelétrica), variável de estado (armazenamento do reservatório) e entrada do sistema (vazão afluente); no intervalo de tempo  $t$ . O previsor de vazões fornece  $\hat{q}_t$  é então avaliada por simulação, e se passa do intervalo de tempo  $t$  para  $t + 1$ .

O princípio do Controle Preditivo quando aplicado ao despacho hidrotérmico é ilustrado na Figura 14. No intervalo de tempo  $t$  o previsor gera uma sequência de  $T$  vazões afluentes previstas, e baseado nesta informação o otimizador calcula as ações de controle futuras para atender a demanda minimizando o custo da complementação termoelétrica. Somente a primeira decisão de controle ( $q_t$ ) é implementada até o próximo intervalo de tempo, quando todo o processo é repetido com base nas novas informações observadas. Este modo de operação minimiza os erros de operação em usinas hidrelétricas provocados pelos erros de previsão de vazões. Esta formulação foi expandida e explorada em Marques (2006) e Zambelli et al. (2011).

A aplicação de MPCs ao despacho hidrotérmico, um problema de planejamento de médio/longo prazo, é fundamentada no trabalho de Martinez e Soares (2002). Este trabalho contrasta a abordagem malha fechada (*closed-loop*) usualmente adotada na otimização do despacho com uma abordagem malha aberta (*partial open-loop*).



Fonte: Marques, Cruz e Vinhal (2010)

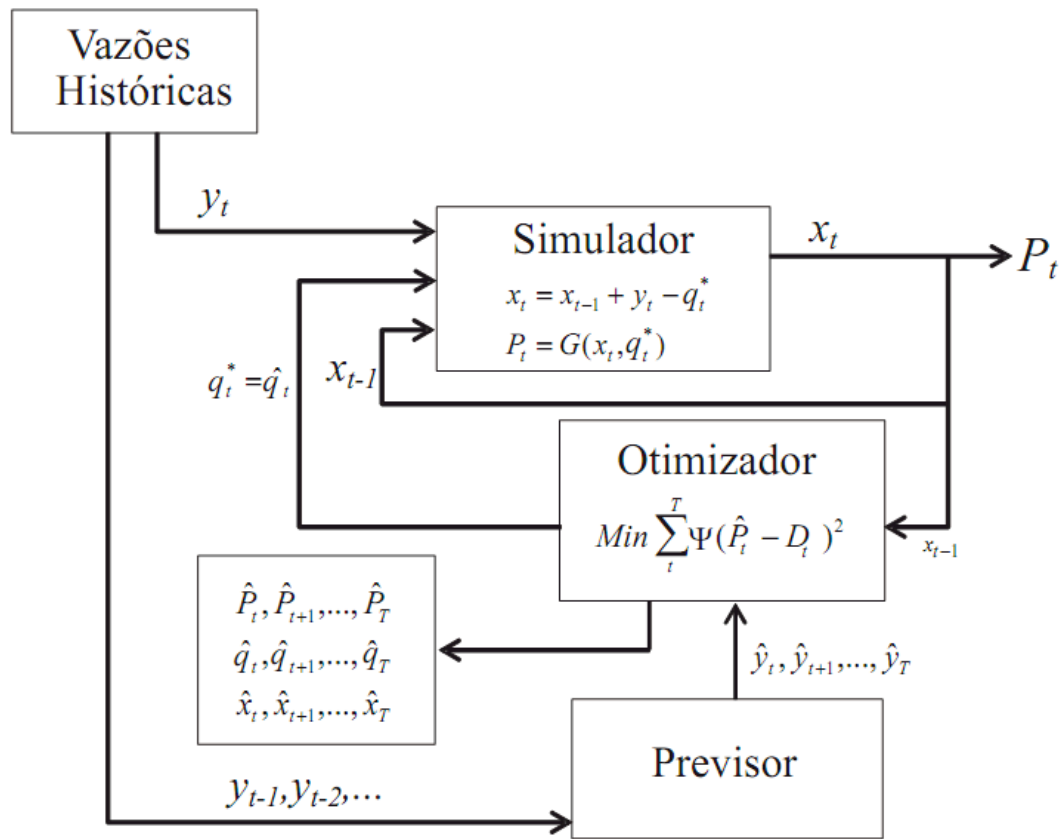
Figura 13 – Variáveis de um Modelo de Controle Preditivo para a otimização do despacho hidrotérmico

À primeira vista, uma abordagem malha fechada é mais robusta, pois esta fornece não apenas valores numéricos ótimos, mas sim uma função para determinar os valores ótimos com base no estado do sistema. No entanto, os autores enfatizam que a abordagem malha fechada é limitada pela "maldição da dimensionalidade", isto é, na explosão combinatória de estados a avaliar quando se faz uso de séries sintéticas (no caso do despacho hidrotérmico, séries de afluições hidrológicas). Algoritmos malha fechada são então forçados a adotar simplificações como a agregação em reservatórios equivalentes. Estas simplificações introduzem erros de modelagem que reduzem a qualidade dos resultados.

Os autores analisam como alternativa o uso de *open-loop feedback control*, onde a incerteza anteriormente modelada como séries temporais fica implícita por modelos de previsão. O Controle Preditivo é um exemplo de modelo que usa esta abordagem. O desafio é que a previsão de vazões em escalas maiores que o mês é bastante difícil para o Brasil. Ainda assim, os autores determinaram através de experimentos numéricos que uma abordagem malha aberta é mais eficiente em períodos de seca. O modelo malha fechada apresenta algumas vantagens quando são simuladas séries de afluição sintéticas.

No entanto, no presente projeto espera-se trabalhar com modelos de operação em condição de cheia, cujos horizontes de planejamento tendem a ser menores que os horizontes





Fonte: (MARQUES; CRUZ; VINHAL, 2010)

Figura 14 – Princípio do Controle Preditivo aplicado ao despacho hidrotérmico

plurianuais do despacho hidrotérmico. Com um horizonte reduzido, é possível melhorar a qualidade da previsão de vazões, e neste caso uma abordagem malha aberta é claramente preferível. Assim, a adoção de MPCs na otimização da operação em condições de cheias é justificada.

Em um MPC os valores futuros para um sistema de espaço de estados são computados nos chamados modelos internos. A diferença entre a previsão dos estados e os valores alvo para cada espaço de tempo dentro do período chamado como horizonte de previsão são então incorporados em uma função objetivo. Esta função é usada como entrada de dados, em conjunto um grupo de restrições para o sistema, que definem o problema de otimização para qual a solução através de um algoritmo de otimização representa o controle ótimo do sistema.

O MPC é especialmente útil quando é necessário lidar com sistemas com múltiplas variáveis e problemas com restrições uma vez que variáveis múltiplas, como por exemplo níveis de água, vazões de saída e geração hidrelétrica podem ser facilmente integradas à função objetivo usando fatores de ponderação para definir a importância de cada termo na otimização, enquanto que as restrições podem ser integradas diretamente como entradas do otimizador. O que significa que é possível determinar como operar as estruturas hidráulicas, como as comportas hidráulicas,

barragens e vertedouros, para diferentes fins como por exemplo, para produzir uma quantidade máxima de energia hidráulica, manter um nível de água desejado no rio ou manter uma dada descarga de um rio.

Diferentes tipos de modelos internos para MPC foram utilizados para aplicações de recursos hídricos. O modelo *Integrator Delay* (ID) desenvolvido por Schuurmans et al. (1999), que também foi utilizado por Overloop (2006), Şahin e Morari (2009), Clemmens et al. (2012) se mostra vantajoso uma vez que possui o recurso de considerar o retardamento temporal da propagação da onda.

Uma abordagem para um modelo hidráulico mais completo foi aplicada por outros autores como Glanzmann et al. (2005), que utilizou um modelo linearizado baseado nas ESV, desenvolvido por Chapuis (1998), que aplicou o MPC e um trecho de rio com hidrelétricas operando em cascada. Chiang, Wilems e Berlamont (2010) utilizou a versão totalmente dinâmica das ESV para calibrar e comparar os resultados obtidos por um modelo simplificado conceitual baseado em uma abordagem do tipo de reservatório, no qual foi utilizado para controle em tempo real de cheias para o rio Demer na Bélgica. A vantagem destes modelos é que eles são capazes de reproduzir o comportamento dinâmico do sistema. No entanto, estes modelos podem também implicar em um aumento significativo de esforço computacional para executar os processos iterativos do otimizador. Schwanenberg et al. (2012) é proposto utilizar um modelo de ondas difusivas para os sistemas de polderes na região de planície Holanda, que representa uma simplificação a simulação mantendo algumas das características dinâmicas e desta maneira obtendo uma resposta rápida necessária para um sistema controle em tempo real.

Os Modelos internos para MPC precisam ser precisos o suficiente para simular o processo de roteamento e refletir o comportamento dinâmico do sistema. No entanto, eles também devem ser mantidos tão simples quanto possível, a fim de evitar grande tempo computacional dentro das rotinas de otimização, preservando a robustez no processo de iteração. Os esforços para melhorar o desempenho incluem o uso de otimizadores baseados em gradiente, o que implicará em requisitos adicionais para a esquematização e implementação do modelo. O uso de um modelo adjunto para a computação do gradiente da função objetivo foi implementado por Schwanenberg, Verhoeven e Boogaard (2010) e aplicado no rio Reno, que se mostrou altamente eficiente na resolução de modelos não-lineares. Ding e Wang (2006) também usaram uma abordagem semelhante para obter os gradientes para módulos de otimização baseados em algoritmos de memória limitada semi-Newton.

### 6.3 Modelo Adjunto - Otimizador

Neste capítulo será explicado a ideia por trás do modelo adjunto do reservatório e como o otimizado selecionado para este trabalho resolve o problema de operação de reservatórios.

Em um MPC simultâneo o modelo interno será declarado como uma igualdade de restrição definida pela Equação 6.5, já para um MPC Sequencial utiliza a simulação dos estados dentro da função objetivo conforme a as equações 6.1 e 6.2. Em Xu e Schwanenberg (2012) é demonstrada uma abordagem sequencial para sistemas reservatórios que se mostrou mais rápida que a simultânea, uma vez que o número de variáveis na otimização é reduzido e a integração do modelo de processos é feita diretamente.

Por motivos de desempenho, os otimizadores preferencialmente recebem o gradiente da função objetivo em relação a cada variável de controle dentro do MPC. Desta forma é possível reduzir o tempo de computação tanto para o o método simultâneo quanto para o sequencial. Enquanto que o cálculo do gradiente é feito diretamente na abordagem simultânea, na abordagem sequencial é necessário uma diferenciação algorítmica do modelo de simulação por procedimentos como a diferenciação algorítmica de modo posterior ou modelos adjuntos baseados na diferenciação algorítmica em modo reverso ou derivados através formalismos auxiliares como multiplicadores lagrangianos (GRIENWANK; WALTHER, 2008).

## 6.4 IPOPT - Interior Point Optimizer

IPOPT ou *Interior Point Optimizer* é um pacote de software *open-source* para otimização não linear de grande escala, sendo utilizado para problemas gerais de programação não-linear Wächter e Biegler (2006), Wächter (2009).

Um modelo simples pode fornecer uma precisão suficiente para a gestão de curto prazo, sendo apresentado pela seguinte forma:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad (6.16)$$

$$g_L \leq g(x) \leq g_U \quad (6.17)$$

$$x_L \leq x \leq x_U \quad (6.18)$$

Onde  $x \in \mathbb{R}^n$  são as variáveis de otimização com limites superiores e inferiores, respectivamente  $x_U$  e  $x_L$  e  $f(x)$  é a função objetivo e  $g$  são as constantes. Sendo que:

$$x_U \in (\mathbb{R} \cup +\infty)^n \quad (6.19)$$

$$x_L \in (\mathbb{R} \cup -\infty)^n \quad (6.20)$$

$$f^n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \quad (6.21)$$

$$g^n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m \quad (6.22)$$

## 7 Numerical Weather Prediction

Em Shuman (1989) mostra que as técnicas de *Numerical Weather Prediction* (NWP), vem sido aperfeiçoadas constantemente desde a década de 1960, e está diretamente vinculado com o desenvolvimento do poder de processamento e dos supercomputadores, muitos dos cálculos dos modelos conceituais iniciais, tomavam muito tempo para serem resolvidos mesmo com auxílio de supercomputadores. Somente recentemente este tipo de técnica se tornou mais acessível e confiável.

Um *Ensemble Prediction System* (EPS) pode ser definido como sendo um sistema de NWP, que permite estimar as incertezas em uma previsão climática, bem como a previsão climática mais provável. Ao invés de executar o NWP uma única vez (previsão determinística), o modelo é executado diversas vezes variando as condições iniciais ligeiramente. Em alguns casos os modelos físicos podem também ser ligeiramente modificados: No caso dos EPS multimodelos são empregados mais de um modelo no *ensembles*; e para o EPS multifísico utilizam-se diversas combinações de esquemas de parametrização física. Então o EPS é formado por diversas soluções sendo que cada solução individual NWP que o compõe é denomina membro do *ensemble*

Devido ao custo tanto financeiro quanto computacional para executar um NWP diversas vezes, o EPS geralmente é gerado com metade da resolução espacial ao NWP equivalente determinístico. O EPS geralmente inclui uma previsão controle, que utiliza a mesma resolução de um modelo *ensemble* mas sem quaisquer perturbações e alterações incorporadas à análise ou modelo (ECWMF, 2015).

A gama de soluções distintas fornecidas em uma previsão, permite avaliar a incerteza dela, e quão fidedigna é a previsão determinista. As incertezas podem variar bastante de um dia para outro por causa da situação sinótica; e a abordagem EPS permite realizar uma estimativa destas incertezas. O EPS é projetado para provar a função de distribuição de probabilidade de uma previsão climática, e muitas vezes é usado para produzir previsões de probabilidade, que serão usadas para avaliar a probabilidade de que os resultados irão ocorrer (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2012).

### 7.1 Previsão Estocástica x Previsão Determinística

De acordo com Gneiting e Raftery (2005) ocorreu durante as últimas décadas uma mudança radical em relação a utilização e emprego de NWP (*Numerical Weather Prediction*). Até o início dos anos 90, as previsões para estados atmosféricos futuros eram geradas a partir de

modelos de predição climática determinística, os quais cuidadosamente desenvolvidos para este fim em centros meteorológicos e utilizando sofisticados recursos computacionais (e até mesmo com supercomputadores).

Até então os pesquisadores da área entendiam que a previsão climática era uma tarefa intrinsecamente determinística, onde a melhor previsão climática era resultado do único e melhor conjunto dados iniciais. Muito embora previsões de tempo determinística ainda sejam largamente utilizadas, a previsão climática foi transformada com o advento de técnicas estocásticas.

Os modelos atmosféricos estocásticos apresentam vantagens em relação aos modelos determinísticos tradicionais, como por exemplo, o uso de previsões probabilísticas combinadas com a otimização estocástica multifásica é vantajosa em comparação com uma abordagem determinística para gerenciamento com horizonte de previsão de curto prazo para reservatórios porque as previsões probabilísticas muitas vezes mostram uma habilidade melhor e estão disponíveis para horizontes mais longos, o que permite detectar eventos críticos com maior antecedência e assim antecipar melhor os impactos e ações mitigadores através de decisões mais precoces; outra vantagem das previsões probabilísticas está na propagação das incertezas de previsão através do processo de tomada de decisões e sua visualização pelos *stakeholders* (SCHWANENBERG et al., 2015).

No entanto conforme as escalas temporais aumentam, como no caso das simulações de médio a longo prazo, estes modelos começam a apresentar deficiências e limitações, devido ao comportamento não-linear e caótico dos processos atmosféricos, então conforme a escala temporal avança observa-se um aumento dos erros nas condições iniciais (LORENZ, 1963; LORENZ, 1965).

Estas variações e erros podem resultar em previsões improváveis ou mesmo pouco factíveis, portanto uma forma de tratar os erros e variações gerados pelas condições iniciais e/ou mesmo por uma representação numérica inadequada utilizam-se as previsões por conjunto também conhecidas como *ensembles*.

Outro ponto importante que é discorrido em ECWMF (2015), é a importância na emissão de previsões de tempo confiáveis para qualquer serviço meteorológico durante condições meteorológicas normais, uma vez que estas constroem a confiança com o público; desta forma, ao criar confiança na capacidade do serviço de meteorologia em realizar previsões corretas em condições climáticas normais, cria-se naturalmente uma maior confiança mesmo nas previsões probabilísticas em casos de condições meteorológicas extremas. Porém há também necessidade de manter a consistência nas previsões durante o tempo, pois previsões precipitadas e instáveis tendem a minar a confiança pública, principalmente quando associadas a um evento extremo, já que uma previsão ruim para 5 dias só será identificada como tal, após os cinco dias, mas no caso

de uma previsão precipitada será identificada imediatamente.

Muito embora haja uma certa necessidade de um NWP ser até certa medida "precipitado", não há necessidade nenhuma para transmitir essa informação "precipitada" ao público, baseado somente no resultado determinístico mais recente. A melhor maneira de evitar isto é através da informação sobre a incerteza da previsão, que pode ser melhor avaliado nas previsões estocásticas. As previsões estocásticas tem a vantagem de transmitir mais informações do que as previsões determinísticas simples, mas os meteorologistas podem às vezes paradoxalmente ajudar os usuários finais das previsões ao não emitir previsões que contenham muita incertezas ECWMF, op. cit..

## 7.2 Ensembles

A geração elétrica das usinas termoelétricas é mais previsível, podendo ser programadas com maior facilidade, já que é possível aumentar ou diminuir a geração através do controle da alimentação do combustível dos geradores. Mas para usinas de fonte renováveis como o caso das hidroelétricas e geradores eólicos, não é possível realizar este controle da geração, uma vez que as fontes energéticas dos geradores estão sujeitas às incertezas decorrentes da variação temporal, espacial e climática das mesmas.

Em sistemas hidrodinâmicos o comportamento de fluxo pode apresentar padrões estacionários, ou mesmo com oscilações em períodos regulares, no entanto existem alguns padrões que apresentam uma variação irregular, que mesmo após observação de longos períodos não é possível identificar padrões de repetição. Estes casos podem ser determinados como não-periódicos.

Principalmente quando os padrões são periódicas ou não variam com o tempo, é possível obter soluções particulares de maneira analítica, porém geralmente as soluções para eventos não-periódicos não podem ser obtidas facilmente via procedimentos numéricos, para tanto sistemas finitos de equações determinísticas não-lineares ordinárias podem ser atribuídas para representar a dissipação do sistema. As soluções destas equações podem ser identificadas através de uma trajetória no espaço físico. Para estes sistemas com soluções delimitadas, é observado que as soluções não-periódicas são instáveis e sensíveis a pequenas mudanças nos estados iniciais do sistema (LORENZ, 1963).

Através do sistema de equações de convecção 7.1, proposto inicialmente por LORENZ, op. cit., é possível ilustrar como esses efeitos de baixa frequência influenciam a trajetória da

função atmosférica considerando uma pequena modificação ao modelo.

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= -\sigma x + \sigma y + f, \\ \dot{y} &= -xz + rx - y - f, \\ \dot{z} &= xy - bz, \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Onde

$$\tau = \pi^2 H^{-2} (1 + a^2) kt; \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned} r &= R_e^{-1} R_a, \\ R_a &= g a H^8 \Delta T v^{-1} k^{-1}, \\ R_e &= \pi^4 a^{-2} (1 + a^2)^3, \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$b = 4(1 + a^2)^{-1} \quad (7.4)$$

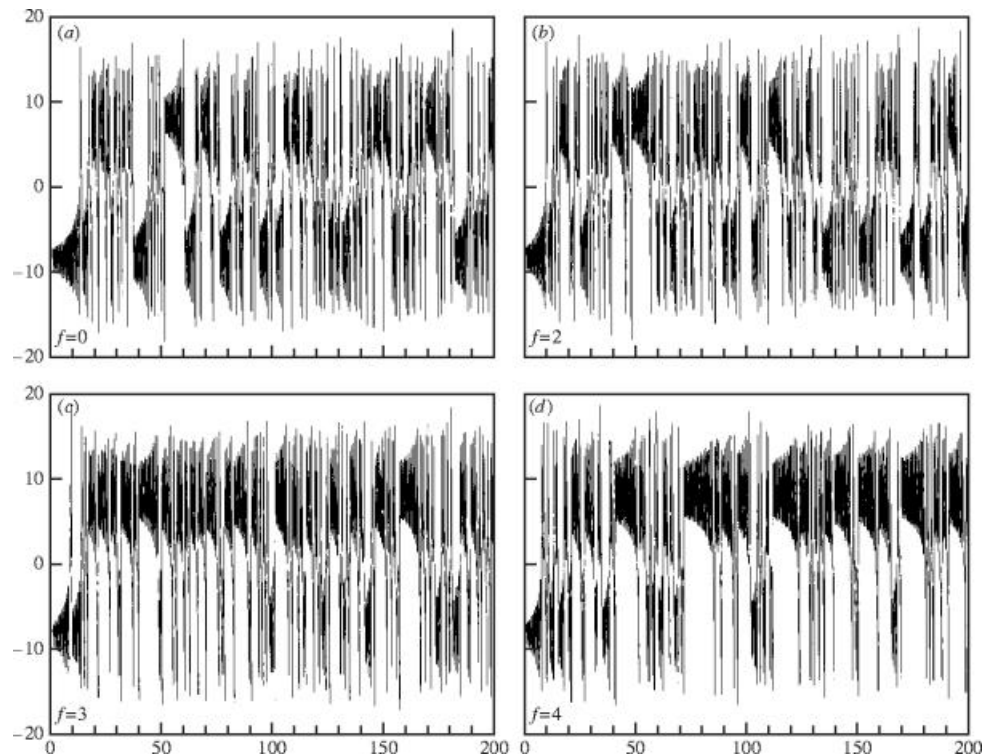
No sistema 7.1  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  e  $\dot{z}$  são derivadas em relação a uma escala de tempo  $\tau$  adimensional (Equação 7.2),  $H$  é a profundidade,  $g$  é aceleração da gravidade,  $a$  coeficiente de expansão térmica,  $v$  viscosidade cinemática,  $k$  condutividade térmica,  $r$  é o número de *Prandtl* definido conforme 7.3 e  $b$  conforme 7.4.

Considerando que  $f$  é considerado um forçamento atmosférico que está variando em uma escala de tempo longa, ou seja representa a evolução temporal de um evento atmosférico. Neste ao variar ligeiramente o valor de  $f$  no sistema 7.1, mesmo para valores fixos de  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $r$  e  $b$  é esperado que haja uma grande variação nos estados finais ou resultados.

A Figura 15 mostra a escala temporal da componente  $x$  para diferentes valores de  $f$ , averigua-se que o modelo é caótico e sensível aos valores iniciais, mas é claro que  $f$  tem um efeito previsível na probabilidade do vetor encontrar-se em um dos regimes de Lorenz. Na prática o  $f$  pode representar alguma variável do sistema atmosférico com variação lenta como o *El Niño*, a circulação termohalina ou efeitos dos gases estufa (PALMER et al., 2005).

A previsão climática por conjuntos ou por *ensembles* conforme dito anteriormente é uma previsão estocástica, eles consistem de múltiplos resultados (geralmente entre 5 e 100) de modelos NWP. Cada resultado é gerado através variações em suas condições iniciais (LEITH, 1974; HOFFMAN; KALNAY, 1983) e/ou representação numérica da atmosférica diferentes





Fonte: Palmer et al. (2005)

Figura 15 – Impacto de um forçamento externo  $f$ , no estado do vetor do modelo de Lorenz (1963). (a)  $f = 0$ , (b)  $f = 2$ , (c)  $f = 3$  e (d)  $f = 4$ .

entre si (STENSRUD; WEISS, 2002), ou ainda, previsões a partir de um conjunto de modelos distintos (ZHANG; KRISHNAMURTI, 1999; HOU; KALNAY; DROEGEMEIER, 2001). Desta forma é possível abordar as duas maiores fontes de incertezas nas previsões, que são justamente os dados de entrada, representações numéricas ou no modelo.

Esta técnica é bastante versátil sendo citadas na literatura internacional diferentes abordagens de aplicação. Os *ensembles* multimodelos, consiste de um conjunto de modelos com diferentes versões de parametrizações físicas (e/ou difusão), que se mostra superior quando comparado com modelos individuais. Conforme Krishnamurti et al. (2000) a capacidade desta técnica supera as dos modelos convencionais, uma vez que a trajetória da função da análise multi-modelo tende a apresentar valores mais próximos dos dados observado.

Outra forma de aplicação descrita por Taylor e Buizza (2003) descreve uma previsão para o intervalo de até 10 dias futuros para demanda elétrica utilizando 51 cenários para cada componente de demanda elétrica em comparação com a técnica padrão de um ponto para cada

variável climática no modelo de demanda. Visto que a demanda é uma função não-linear de variáveis climáticas, o modelo convencional consiste em aproximar uma função não-linear de variáveis aleatórias por uma função não-linear dos mesmos valores previstos pelo modelo de simulação de incertezas de variáveis aleatórias. A técnica de 51 cenários é mais eficiente porque seria o equivalente a pegar os valores esperados de uma estimativa da função de densidade de probabilidade de demanda, esta técnica no entanto não contempla incertezas do modelo de demanda.

Para obter todo o potencial de uma previsão *ensemble* é necessário realizar pós-processamento estatístico dos resultados do modelo a fim de corrigir os vieses e representações insatisfatórias das incertezas da previsão. Junto com este pós-processamento estatísticos, estas previsões estocásticas fornecem previsões probabilísticas fluxo-dependentes através de distribuições probabilísticas para horizontes futuros.

A aptidão de um NWP em realizar previsões precisas é fluxo-dependente, ou seja, para melhorar a precisão de um *ensemble* deve-se Identificar as configurações de fluxo atmosféricos e quantificar a sensibilidade dos NWPs a estes eventos é relevante para a interpretação da previsão e desenvolvimento dos modelos.

As previsões probabilísticas permitem quantificar riscos relacionados ao clima, e para uma ampla gama de aplicações como geração elétrica, planejamento de rotas de aviões e navios, estudos financeiros de riscos climáticos; eles têm uma maior utilidade do que as previsões determinísticas (GNEITING; RAFTERY, 2005).

Os atuais desafios incluem representação das incertezas de previsão devido ao uso de modelos numéricos não otimizados. Estas incertezas podem ser abordadas através do emprego de *ensembles* multimodelos, no qual cada simulação é determinística; ou através de representações estocásticas de processos físicos parametrizados, conforme empregado no *ensemble* de médio prazo do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), desta forma introduzindo aleatoriedade nas simulações dos modelos.

É necessário também melhorias na comunicação, visualização e avaliação de previsões probabilísticas. Há também necessidade de reconciliar as diferentes interpretações da probabilidade, para evitar o risco aperfeiçoamento das metodologias de *ensemble* sem um objetivo claro. Por isso existe o paradigma de maximizar a nitidez das previsões probabilísticas através de restrições de calibração pode oferecer alguma orientação. A Calibração refere-se à consistência estatística entre as previsões probabilísticas e os dados observados; nitidez refere-se ao espalhamento ou grau de propagação das distribuições preditivas. O objetivo é aumentar a nitidez nas previsões, sem comprometer a validade das afirmações probabilísticas.(GNEITING; RAFTERY, 2005)

Em Molteni et al. (1996), Buizza et al. (2005) as previsões quantitativas de precipitação ou QPF (*Quantitative Precipitation Forecasts*) do EPS global do ECMWF são utilizadas como forçamento meteorológico do modelo de previsão hidrológica. Os dados desta avaliação obtidos a partir dos portais THORPEX (*The Observing System Research and Predictability Experiment*) e TIGGE (*Interactive Grand Global Ensemble*) (BOUGEAULT et al., 2010). Em estudo de Fan et al. (2014) os *ensembles* do ECMWF mostraram melhor aptidão para a Bacia de Rio São Francisco em comparação com os NWP do NOAA e CPTEC .

As previsões EPS do ECMWF consistem de 50 membros de precipitação perturbada de 0,5 graus de resolução para todo o globo considerando incertezas iniciais através do uso de vetores singulares e modelos de incertezas devido a parametrizações físicas através de um esquema estocástico (BUIZZA et al., 2007). As informações são disponibilizadas duas vezes ao dia com um horizonte de previsão de 15 dias e escala temporal de 6 horas. Para aplicabilidade em modelo hidrológico, é necessário reduzir a escala espacial através de polígonos de *Thiessen* e desagrega-los para uma escala temporal horária. Como referência e comparação entre resultados determinísticos e probabilísticos, nós também consideramos a previsão probabilística do ECMWF, que também está disponível no portal TIGGE.

Os EPS globais do ECMWF são geralmente projetados e utilizados em previsões de médio-prazo (Horizonte de Previsão de 3-15 dias à frente). Eles utilizam NWP globais e são executados utilizando resoluções espaciais relativamente baixas com malhas variando entre 30 km e 70 km. Apesar de serem concebidos com objetivo principal para previsões de médio-prazo, devido ao fato que este produto está disponível para todas regiões do globo, em regiões onde não exista outro produto disponível, é possível aplica-lo para previsões de curto-prazo. Justamente por esta ser a situação de muitos países-membros da WMO (*World Meteorological Organization*) , neste contexto, eles são usados extensivamente para gerar produtos de apoio em diversos projetos como o *Severe Weather Forecasting Demonstration Project* (SWFDP), (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2012).

### 7.2.1 Dispersão do *Ensemble*

Justamente como foi explicado na seção 7.2, devido ao comportamento não-linear e caótico dos processos atmosféricos existem uma tendência de grandes desvios das trajetórias das previsões climáticas, conforme a escala do tempo avança mesmo quando as condições iniciais são ligeiramente entre si. Este comportamento de todos os membros do EPS de mudar de comportamento conforme o tempo avança é conhecida como a dispersão do *ensemble*.

Então a dispersão de um *ensemble* é definida como uma medida da diferença entre os membros e é representada pelo desvio padrão em relação ao *ensemble* médio (EM)(ECMWF, 2015; WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2012). Geralmente uma dispersão

pequena indica uma alta precisão *a priori* da previsão enquanto que uma dispersão alta indica uma baixa precisão *a priori* da previsão. A dispersão também é fluxo-dependente e varia para os diversos parâmetros. Normalmente há uma tendência de aumentar conforme o horizonte de previsão, mas podem existir casos onde a dispersão está maior em horizontes menores em relação a horizontes maiores, isto pode ser explicado pelo fato que os primeiros dias apresentam uma grande influência de complexas relações e estruturas dos sistemas sinóticos, mas que no entanto serão seguidos por uma grande predominância de sistemas de alta pressão e de tempo bom.

A dispersão de um EM como medida da precisão *a priori* é aplicada somente para o erro da previsão do EM, não para mediana, controle ou HRES, mesmo no caso deles estarem dentro do horizonte de precisão do *ensemble*. A dispersão do *ensemble*, em relação a um membro específico do conjunto é por exemplo por volta de 41% maior do que a dispersão do EM. A dispersão em respeito ao controle é inicialmente a mesma do EM, mas vai gradualmente aumentando, até que alcança os mesmo 41% de qualquer membro (ECWMF, 2015).

## 7.2.2 Diagrama de Previsões em Árvore

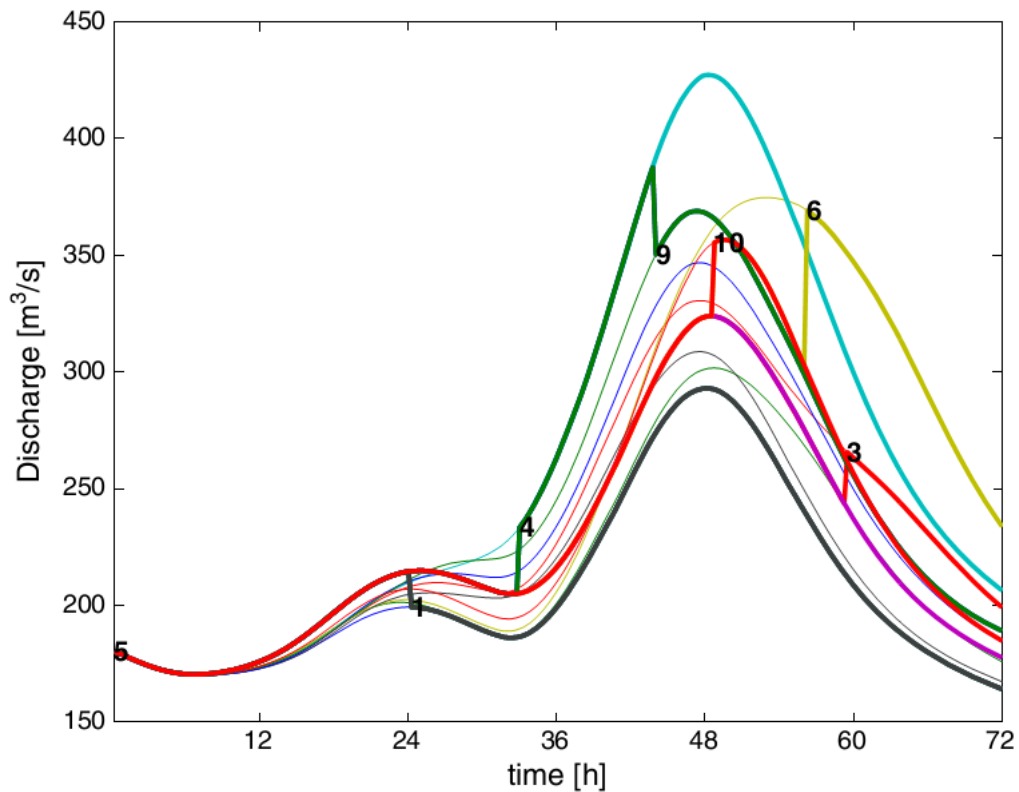
Nas abordagens citadas acima, as incertezas são consideradas como sendo igual para todo o horizonte de previsão, assumindo implicitamente que nenhuma informação futura será atualizada, sendo que as incertezas mudam conforme as decisões são tomadas num estágio inicial ou final deste horizonte. Na prática novas informações serão disponibilizadas com o tempo, permitindo revelar qual *ensemble* terá mais probabilidade de ocorrer. Assim que a incerteza é resolvida, o controlador irá mudar a estratégia de controle, adaptando-a para o atual cenário.

O Diagrama de Cenários em Árvore possui ramificações, apresentando no primeiro intervalo de tempo uma raiz que se ramificará após o primeiro vértice, nesta fase inicial todas as trajetórias futuras são possíveis. Conforme que as incertezas são definidas, ramificações são introduzidas. Em cada ponto de ramificação, o espaço amostral do ramo original se divide em ao menos dois novos subconjuntos.

Para previsões em tempo real, os diagramas de cenários em árvore mostram-se bastante adequados e apropriados, podendo ser empregadas em uma programação estocástica multiestágio, desta forma através do diagrama em árvore é possível observar quando as trajetórias das funções divergem entre si. Pode-se observar na que assim como nos *ensembles*, as trajetórias da função começam bastantes próximas no início do gráfico e posteriormente se divergindo conforme a escala de tempo avança.

Existem diferentes metodologias para gerar diagramas em árvore a partir de cenários completos de *ensembles*. Em Štutienė, Makackas e Pranevičius (2010), é demonstrado um método empírico de agrupamento de cenários; e em Raso et al. (2013), apresentada uma outra abordagem

que considera somente as variáveis o controlador é capaz de observar ao longo do horizonte de previsão e os níveis de previsão. Já em Gröwe-Kuska, Heitsch e Römisch (2003) a construção dos cenários é feita utilizando uma estratégia de redução de cenários inversa, aplicada para cada passo de tempo do horizonte de previsão do *ensemble*.



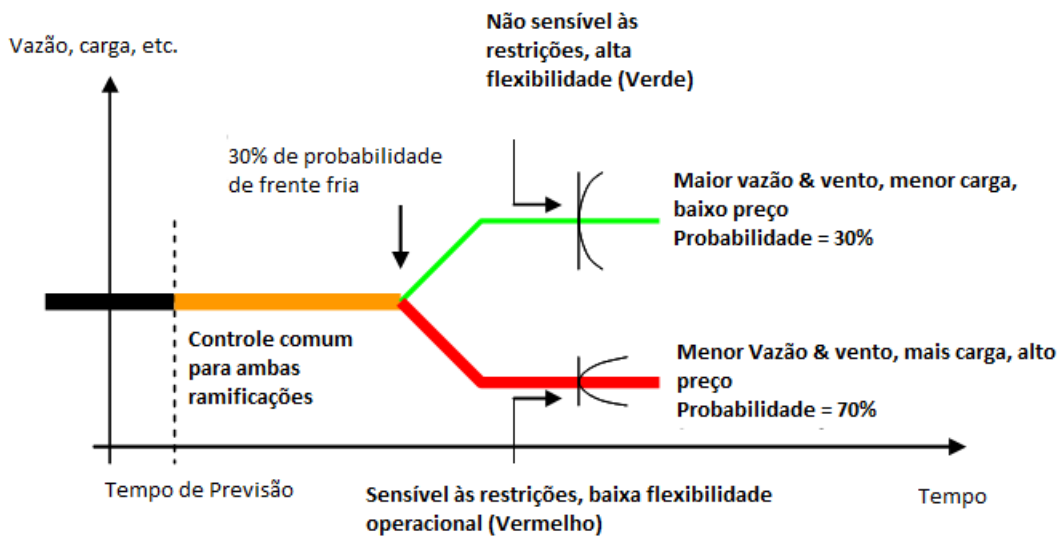
Fonte: Raso et al. (2013)

Figura 16 – Diagrama em Árvore conforme RASO.

O critério para encerrar a redução de cenários pode ser definido de diversas maneiras. Um diagrama de cenários em árvore com estrutura fixa pode ser criado por determinação de um número predefinido de reduções para qualquer intervalo de tempo no horizonte de previsão. Uma segunda abordagem é de utilizar uma estratégia de redução máxima para determinar uma distribuição de probabilidade reduzida do processo estocástico representado pela previsão de *ensemble*.

Os *ensembles* tem sido aplicados diretamente em programação estocástica, mas tendem a sobrestimar as incertezas, já que não consideram a solução esperada futura. A causa disto é a própria programação estocástica multiestágio, a árvore serve para incorporar dados dos *ensembles* na programação, especificando os momentos em que as incertezas são resolvidas.

Na Figura 17 (a grossura da linha representa a probabilidade e a cor a flexibilidade operacional); em Schwanenberg et al. (2015), os autores sugerem utilizar cenários em árvore



Fonte: Kuwajima et al. (2013)

Figura 17 – Diagrama em Árvore para de Sistemas de produção hidroelétrica e comercialização de energia no verão.

para uma melhor representação das incertezas de previsão para um *ensemble* em uma otimização estocástica multiestágio. através de um método que deriva o diagrama em árvore dos dados de precipitação para gerar um diagrama em árvore de vazões.

Desta forma é possível considerar a defasagem entre a precipitação observada e a previsão de vazão em bacia hidrográficas de grande escala, ou seja no momento em que a maior parte da incerteza meteorológica é definido. Além disto, nesta abordagem as médias do espaço amostra aplicado na geração do diagrama em árvore resultam por definição em um valor para o Erro Absoluto Médio idêntico entre o *ensemble* e a representação final do diagrama, já na abordagem de redução de diagramas de árvores padrão os ramos são excluídos do diagrama e as probabilidades são agregadas.

A extrapolação da otimização determinística para uma otimização com abordagem estocástica multiestágio resulta em várias vantagens conceituais. Uma vantagem importante é a opção de se tomar decisões baseadas no risco ao considerar as incertezas da previsão na otimização. Com isto provavelmente é possível obter-se decisões mais robustas. Além disto a amostragem das trajetórias controle facilita a integração de não-linearidades e das restrições.

### 7.2.3 Técnicas de Assimilação de Dados e Fontes de Incertezas

O desenvolvimento e aplicação de modelos para processos de chuva-vazão têm evoluído desde o começo da década de 1960 (VRUGT et al., 2006b); dentre estes modelos as classe comumente designada com o "Modelos Conceituais de Bacias Hidrográficas" representa aspectos

perceptivos e conceituais do entendimento hidrológico do comportamento da bacia hidrográfica em escalas agregadas (KUCZERA, 1997). Os modelos conceituais utilizados na previsão de vazão operacional, costumam apresentar diversos parâmetros que especificam o comportamento de funções de transferência relativas às entradas e saídas de água através de caminhos que conectam os volumes conceituais de armazenamento de umidade para camadas do solo de diferentes profundidades. Assume-se que estes volumes de armazenamento conceituais sejam correspondentes com volumes de controle existentes no espaço físico "real, mesmo que os limites destes volumes de controle não possam ser explicitamente delineados.

Apesar do progresso no desenvolvimento e aplicação de procedimentos automatizados para calibração de modelos hidrológicos, estes métodos tendem a não tratar com rigor as fontes de incertezas (BEVEN; BINLEY, 1992; THIEMANN et al., 2001; VRUGT et al., 2005)). A maioria dos procedimentos tende a levar em conta explicitamente somente as incertezas de medição de vazão como em Sorooshian e Dracup (1980), Sorooshian, Duan e Gupta (1993) ou nas estimativas dos parâmetros com em Kuczera (1983a), Beven e Binley (1992), Gupta e Sorooshian (1998), Thiemann et al. (2001), Vrugt et al. (2003a), Vrugt et al. (2006a).

A maioria dos métodos utilizam processamento *batch* dos dados de pesquisa para buscar e determinar estimativas de parâmetros que minimizam a probabilidade de variância global estatística dos resíduos do modelo. Incertezas resultantes de erros associados ao sistema de dados de entrada medidos (precipitação e evapotranspiração potencial); resultantes de erros causados pela inicialização e propagação de variáveis de estado (capacidade de campo do solo); e mesmos dos erros estruturais do modelo decorrentes de uma representação inadequada dos processos físicos (incluindo a agregação de processos distribuídos espacialmente); não foram adequadamente tratadas de forma explícita (VRUGT et al., 2006b).

Durante as décadas passadas métodos para tratar os problemas acima destacados surgiram na literatura, com ênfase para soluções para o problema de se obter uma estimativa razoável para os limites das incertezas sobre as previsões numéricas do modelo. Dentre as estratégias para estimar parâmetros do modelo e incertezas da previsão de fluxo que podem fornecer previsões do valor mais provável de fluxo junto com estimativas dos intervalos de possíveis resultados podemos destacar os modelos bayesianos, pseudo-bayesianos, de teoria dos conjuntos, multi-critérios e de modelos recursivos. Estes métodos acima citados, geralmente sintetizam as incertezas dos modelos em termos de incertezas nas estimativas de parâmetros. (KUCZERA, 1983a; KUCZERA, 1983b; KEESMAN, 1990; STRATEN; KEESMAN, 1991; BEVEN; BINLEY, 1992; KLEPPER; SCHOLTEN; KAMER, 1991; FREER; BEVEN; AMBROISE, 1996; GUPTA; SOROOSHIAN, 1998; THIEMANN et al., 2001; YOUNG; BEVEN, 1994; VRUGT et al., 2003b; VRUGT et al., 2006a).

No começo da década de 1980, foram propostos métodos de filtragem por terem capa-

cidade de manipular explicitamente as incertezas dos modelos hidrológicos. Ao contrário das técnicas mais tradicionais de calibração de modelos, estas técnicas de filtragem em espaço de estados podem continuamente atualizar os estados dos modelos assim que novas medições se tornam disponíveis, e desta forma melhorando a previsão do modelo e precisão da previsão. Dentre as aplicações de algumas variações da técnica original do filtro de Kalman conforme (KALMAN, 1960) para previsão de fluxo em tempo real podem ser destacadas em (TODINI; A.SZÖLLÖSI-NAGY; WOOD, 1976 apud SCHILLING; MARTENS, 1986)<sup>1</sup>, (BRAS; RESTREPO-POSADA, 1980 apud VRUGT et al., 2006b)<sup>2</sup>, Kitanidis e Bras (1980a), Kitanidis e Bras (1980b), Bras e Rodriguez-Iturbe (1985), Wood e O'Connell (1985), Awwad e Valdés (1992), Awwad, Juan e Restrepo (1994), Young (2002).

Em Kitanidis e Bras (1980a), Kitanidis e Bras (1980b) são utilizados Filtros Kalman Estendidos ou *Extended Kalman Filter* (EKF) através de uma reformulação dos espaços de estados para o modelo Sacramento não-linear para investigar estimativas probabilísticas das variáveis de estado e para detectar erros gerados por erros de medição da precipitação atmosférica.

Já no caso da abordagem recursiva de filtros Kalman não teve utilidade operacional por não poder ser aplicada por questões práticas, uma delas pelo fato de que sua implementação exige que um modelo altamente não-linear seja transformado para uma fora de estados de espaço continuamente diferenciável, o que envolve muitas modificações e aproximações, além de que o comportamento de entrada e saída de dados do espaço de estados para o modelo reformulado pode divergir de maneira substancial do modelo original (GEORGAKAKOS; SPERSFLAGE, 1995 apud VRUGT et al., 2006b)<sup>3</sup>, (KITANIDIS; BRAS, 1980a; KITANIDIS; BRAS, 1980b; GEORGAKAKOS; RAJARAM; LI, 1988; REFSGAARD, 1997; SEO; KOREN; CAJINA, 2003).

É importante destacar também que em Evensen (1992), Miller, Ghil e Gauthiez (1994) mostram que os Filtros de Kalman Estendidos são extremamente instáveis no caso de haver muita não-linearidades no modelo. Seo, Koren e Cajina (2003) destaca também que as reformulações adequadas das equações derivadas dos modelos dependem consideravelmente de experiência e conhecimento do modelador. A principal restrição para sua aplicabilidade e uso prático dos métodos de filtragem de espaço de estados são os custos computacionais, que são significantes especialmente para os casos aplicados para problemas que envolvem modelos distribuídos espacialmente e vetores de espaço de estados de alta dimensão.

<sup>1</sup> TODINI, E.; A.SZÖLLÖSI-NAGY; WOOD, E. F. Adaptive state/parameter estimation algorithms for real-time hydrologic forecasting: a case study. In: *IIASA/WMO Workshop Recent Developments Real-Time Forecasting/Control Water Resource Sys.* Laxenburg, Austria: [s.n.], 1976.

<sup>2</sup> BRAS, R. L.; RESTREPO-POSADA, P. Real time automatic parameter calibration in conceptual runoff forecasting models. In: *3rd International Symposium on Stochastic Hydraulics.* [S.l.: s.n.], 1980. p. 61–70.

<sup>3</sup> GEORGAKAKOS, K. P.; SPERSFLAGE, J. A. *Hydrological Forecast System-HFS: A user's manual.* San Diego, CA, 1995.



Recentemente também foram desenvolvidos esforços para modificar estes métodos para torna-los mais aplicáveis: Madsen e Skotner (2005) investigou a aproximação sub-ótima para filtro de Kalman de Cañizares et al. (2001) para atualização adaptiva do espaço de estados no modelo Mike-11, relatando redução dos custos computacionais tornando o método mais adequado que o método de filtro Kalman estendido ou mesmo o método do filtro de Kalman original para aplicações práticas.

Além das técnicas de Filtro de Kalman destacadas acima outras metodologias foram também exploradas recentemente: Seo, Koren e Cajina (2003) utilizou a aquisição variacional ou *variational assimilation* (VAR) como ferramenta para aquisição de dados estimativas climatológicas de evapotranspiração potencial e observações em tempo real de vazão e precipitações para melhorar as previsões de vazão do modelo Sacramento. Este método VAR, é aplicado largamente em modelos hidrometeorológicos e oceanográficas, não precisa de formulação e reformulações do estado de espaços, porém implica em implementar uma programação de um texto-código adjunto que pode ser difícil complicado de deduzir. A técnica de VAR é utilizada também em investigações e estudos hidrológicos, como no caso de Reichle, Entekhabi e McLaughlin (2001), que utiliza aquisição de dados através de sensoriamento remoto (espectro de ondas em um modelo de superfície terrestre) de para estimar distribuições espaciais da umidade de solo.

Recentemente, técnicas de previsão *ensemble* com aquisição de dados sequencial ou *sequential data assimilation* (SDA) tem sido cada vez mais empregadas em parte devido à capacidade desta técnica de tratar explicitamente diversas formas de incertezas em modelos hidrológicos operacionais. As técnicas relatadas inicialmente na literatura incluem a análise de identificação dinâmica para parametrização recursiva e detecção de variação temporal nos parâmetros do modelo (WAGENER et al., 2003); método de identificação de parâmetros baseados na localização das informações (VRUGT et al., 2002); e a abordagens para estimativas recursivas bayesianas (THIEMANN et al., 2001; BAYSAL, 2003; GUPTA et al., 2003).

Recentemente técnicas de Filtro Kalman para *ensembles*, denominadas Filtro Kalman de *Ensembles* ou *Kalman Filter Ensemble* (EnKF) tem mostrado poder e flexibilidade necessária para aquisição de dados através de modelos conceituais para bacias hidrográficas (EVENSEN, 1994). Vrugt et al. (2005) apresentou otimização simultânea e métodos de aquisição de dados ou *Simultaneous Optimization and Data Assimilation* (SODA), que utilizam EnKF para recursivamente atualizar os estados do modelo enquanto estimam valores invariantes aos tempo para parâmetros do modelo através da abordagem de otimização estocástica denominada *Shuffled Complex Evolution Metropolis Stochastic-Ensemble Optimization* (SCEM-UA) (VRUGT et al., 2003b).

Outras inovações que permitiram abordar o problema do custo computacional foram feitas através de uma nova função para a aquisição de dados por SODA, que é o tratamento explícito

dos erros devido às incertezas de parametrização, incertezas de estado das variáveis, erros estruturais do modelo e erros na medição da vazão. Em Moradkhani et al. (2005), Moradkhani et al. (2005) são apresentados dois métodos de estimativa dupla de parâmetros de estado ou *Different Dual State-Parameter Estimation* (DSPE) baseados no método de filtragem EnKF e técnicas sequenciais de Monte-Carlos, que também é conhecida como filtragem de partícula. Já em Gordon, Salmond e Smith (1993), Arulampalam et al. (2002), são implementadas a estimativa recursiva dependente temporalmente dos estados e parâmetros e estados dos modelos.

Tanto os métodos de EnKF quanto o método Sequencial de Monte-Carlo permitem rastreamento preciso dos instantes da função de segunda ordem de distribuição probabilística para modelos não-lineares, no entanto o método sequencial de Monte-Carlos permite também rastrear instantes de ordens superiores o que portanto implica em custos computacionais maiores. O EnKF permite melhor eficiência computacional através do emprego de regras lineares para atualização do espaço de estados, mas pode resultar em desempenho sub-ótimo quando há não-linearidades no modelo.

Vrugt et al. (2006b), sugerem que para Previsão Operacional de Eventos de Cheias são necessárias estimativas precisas das incertezas associadas às previsões de vazão geradas pelos modelos sejam fornecidas junto com os prováveis níveis de escoamento. Em uma implementação estocástica do modelo Chuva-Vazão Sacramento obtida de previsões determinísticas de vazão do NWS (*National Weather Service*) através de uma abordagem Simultânea de Otimização e Assimilação de Dados utilizando um filtro para *ensembles*, foi possível aplicar o modelo sem necessidade de grandes modificações e reconfigurações do modelo. Nesta aplicação no rio Leaf no Mississippi estima-se que houve uma melhora da ordem 30% a 50% do desempenho de previsão, mesmo com uma otimização sub-ótima do filtro de *ensembles*.

Parte IV

Metodologia



## 8 Modelos Hidráulicos e Hidrológicos Utilizados

Para implantação de um SSD *online* para operação de barragens e operação para controle de cheias foram avaliados diferentes modelos para eleger o mais apto neste caso específico; um modelo rápido, preciso e robusto para poder ser implementado em um MPC, o modelo será capaz de fornecer estimativas rápidas e confiáveis de condições de fluxo à jusante relacionadas com as descargas de um reservatório. Uma vez que não existe um modelo de universalmente superior para todas as aplicações, é necessário, portanto avaliar os prós e contras dos modelos disponíveis e aplicáveis para as condições de estudo.

Para esta aplicação, problemas de otimização reservatório de curto prazo de previsão, apontar o modelo mais adequado, é fundamental considerar algumas questões como se o modelo escolhido fornece informações hidráulicas suficientes para responder às perguntas do usuário; precisão do modelo; a precisão exigida da aplicação; a qualidade e a disponibilidade dos dados para alimentar os modelos; e custos computacional e de processamento.

Tabela 7 – Modelos Seleccionados & Equações Governantes.

<b>Nome do Modelo</b>	<b>Modelo Físico</b>	<b>Densidade de Nós de Cálculo</b>
SOBEK	ESV-Totalmente Hidrodinâmica	Deslocamento de Malha
SPRNT	ESV-Totalmente Hidrodinâmica	Transectos
MGB-IPH	Muskingum-Cunge Não-Linear	Não Aplicável
	RR com Integrador de Atraso	Não Aplicável
RTC-Tools	ESV-Onda Difusiva	1 / 30 km
		1 / 10 km

De forma geral, modelos que utilizam as simplificações da ESV são atraentes para este tipo de aplicação devido à sua robustez e melhor desempenho da CPU; no entanto, as simplificações podem criar restrições de aplicabilidade, bem como comprometer a precisão dos resultados.

Na Tabela 7 estão apresentados modelos seleccionados, as equações governantes e a densidade de nós que de forma geral reflete o grau de simplificação espacial do modelo. Os modelos seleccionados são: SOBEK, SPRNT, MGB-IPH e o RTC-Tools; sendo que este último pode utilizar diferentes modelos conceituais e portanto pode ser subdividido em 2 submodelos: Onda Difusiva (DW) e Cascata de Reservatórios (RR). Sendo que o submodelo DW apresenta 2 configurações espaciais diferentes.

Buscou-se escolher aqueles que se baseiam em diferentes modelos perceptuais e equações

conceituais, assim cada um deles utiliza uma abordagem diferente para calcular a propagação do fluxo. Com isso pretende-se possibilitar avaliar a potencialidade deles em processamento simular corretamente os picos de cheias e bruscas alterações de níveis, típicas de operação de reservatórios, com o menor esforço computacional possível.

## 8.1 RTC-Tools

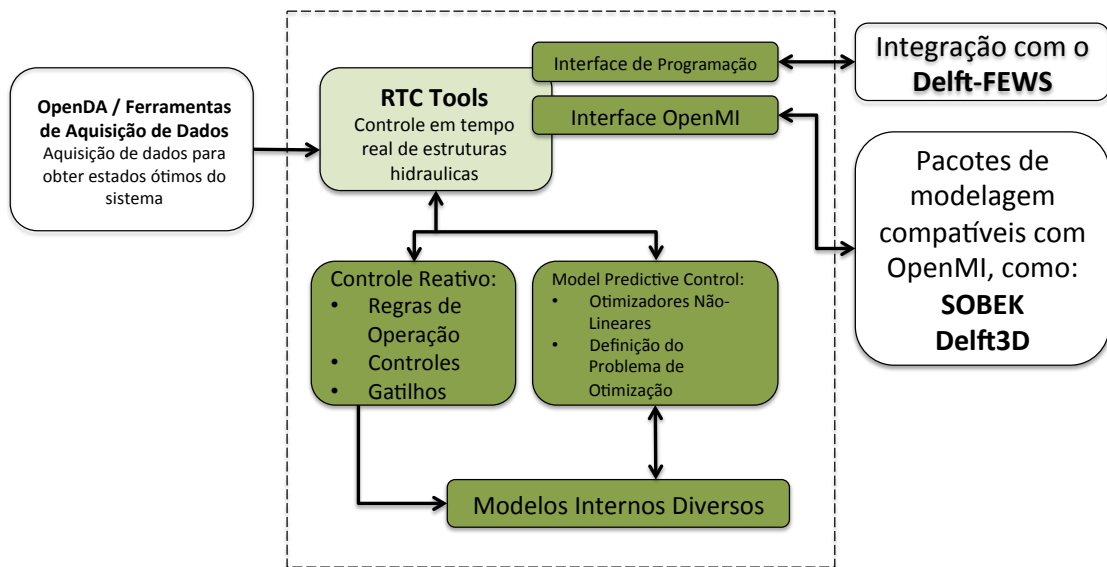
A ferramenta *open source* RTC-Tools (Real-Time Control Tool) é *tool box* modular para aplicações de controle em tempo real e SSD de estruturas hidráulicas. Estão incluídos dentro desta ferramenta estratégias de controle com gatilhos tanto em configuração *feedback* quanto *feedforward*, regras operacionais e controladores além de um pacote avançado de configurações de MPC baseados na combinação de previsão e otimização. O pacote possui opções de configurações sendo possível utilizar diferentes configurações de métodos de estimativa de vazão: inercial, onda difusiva, onda cinemática e Cascata de Reservatórios; permitindo também dentro destas configurações utilizar diferentes esquematizações espaciais: central ou *upwind*. Outra característica que é possível definir são os esquemas de escalas temporal (implícitos ou explícitos), assim permitindo definir modelos físicos, conceituais, ou orientados aos dados para simular o escoamento superficial e escoamento de canais abertos (SCHWANENBERG; BECKER, 2014).

O RTC-Tools é resultado da integração de projetos específicos de módulos de simulação de reservatórios para sistemas de previsão de cheias na Áustria, Alemanha, Paquistão, Países Baixos e EUA. O modelo original de 2007 escrito em Java, também chamado de módulo de reservatório Delft-FEWS, tem como objetivo a simulação da transferência de volumes em reservatórios e sistemas de reservatórios com regras de operação e instrumentados. Em 2008 e 2009 foram adicionados controladores de previsão mais avançados, que incluíam um modelo de propagação cinemática de cheias, um modelo interno adicional para os controladores de previsão e um sistema subjacente para componentes de modelação selecionados, que resultaram em um aumento significativo da velocidade de processamento destes controladores. Em 2010, o conceito de gatilhos para acionamento dos controladores e regras de operação foram introduzidos, permitindo a simulação de esquemas de controle heurísticos mais sofisticados. Mais adiante o software foi reescrito em C++ e aprimorado permitindo integração com pacotes SOBEK ou Delft-3D (SCHWANENBERG, 2009).

O RTC-Tools é um pacote de blocos de elementos para aplicações de controle em tempo real desenvolvido para ser um modelo para ser usado na operação de sistemas hidráulicos, portanto o principal intuito do RTC-Tools é de simular técnicas de controle em tempo real, e não de realizar simulações detalhadas para dimensionamento e projeto. Portanto as simulações deste modelo incluem por definição todos os estados de sistema, gatilhos, controladores, regras de operação e componentes de modelação. .

Como este módulo foi desenvolvido para resolver problemas específicos de controle em tempo real, que podem ser integrados a sistemas maiores, o software fornece interfaces para os sistemas de previsão Delft-FEWS (interface PI-XML) e pacotes de modelação como o SOBEK e Delft3D. A plataforma OpenMI habilita o usuário a combinar regras de operação e controladores definidos dentro RTC-Tools com componentes de modelação hidráulica mais detalhados, que estão disponíveis nos pacotes citados acima (SCHWANENBERG, 2009).

A Figura 18, mostra configurações possíveis dentro deste pacote, destacando a interoperacionalidade inata dele com modelos projetados para fins diferente como OpenDA para assimilação de dados, SOBEK e Delft3D para simulações mais detalhadas e Delft-FEWS para integração com outros modelos, interface gráfica para visualização de resultados, importação de dados e para configuração através de uma interface de programação.



Adaptado de Schwanenberg (2009).

Figura 18 – A configuração do modelo de controle preditivo que pode ser feito no RTC-Tools utilizando otimizadores integrados.

Os componentes do RTC-Tools incluem interfaces importantes para aquisição de dados como OpenDA ou outras plataformas para este fim, que permitem aplicar técnicas de assimilação e incorporação de dados para melhorar o estado do sistema dos componentes de modelagem,

que podem ser utilizadas no contexto de previsão de controle preditivo.

Devido à necessidade de um modelo interno para controladores de modelos de previsão, esta ferramenta possui vários modelos simples de transferência, o que permite utilizar somente este modelo para sistemas de previsão. Além disto a interface OpenMI permite que o usuário utilize uma vasta gama de modelos hidráulicos complementares.

## 8.2 Cascata de Reservatórios - *Reservoir Routing*

Esta abordagem simplificada para calcular escoamento não-estacionário é baseado na conservação de massa, onde a diferença entre Vazão de entrada  $I$  e Vazão de Saída  $O$  é igual a da taxa de variação do armazenamento de um corpo d'água. Esta abordagem também é equivalente à simplificação da Onda Cinética da Equação de Saint-Venant. A Cascata de Reservatórios é dada por:

$$I_t - Q_{t,h} = \frac{\partial s_h}{\partial t} \quad (8.1)$$

Onde  $I$  corresponde a vazão de entrada no "reservatório",  $Q$  é a vazão de descarga do reservatório e  $s$  é a volume de armazenamento,  $h$  é o nível d'água no reservatório,  $t$  corresponde ao tempo. Utilizando escoamento em níveis, na qual o nível d'água para cada reservatório possui uma superfície horizontal, através do seu comprimento, é possível dividir a descarga dos "Reservatórios" em descarga controlada  $Q_c$  e descarga não-controlada  $Q_u$ .

### *Integrator Delay* - Integrador de defasagem de tempo

Schuermans (1997) utiliza uma ferramenta para correção de defasagem chamada *Integrator Delay*, a qual será incorporada em na configuração adotada neste estudo. Então considerando o sistema abaixo:

$$A \frac{\partial h(x,t)}{\partial h} = q(L_u,t) - q(L,t) \quad (8.2)$$

Em fluxo transientes os picos de vazões são amortecidos de forma exponencial e muito rapidamente, não representando impactos no escoamento, e desta forma podem ser descartados (SCHUURMANS, 1997). Desta forma somente alterações na vazão à jusante poderiam ter efeitos no escoamento de canais abertos. O efeito a montante  $q(0,t)$  na vazão a jusante é transiente e o



modelo de defasagem de tempo é descrito por:

$$q(x,t) = q(0,t - T(x)) \quad (8.3)$$

O tempo de defasagem  $T(x)$  é dado pela Equação 8.3 de (SCHUURMANS; BOSGRA; BROUWER, 1995):

$$T(x) = \frac{2x}{(1+k)V_0} \quad (8.4)$$

$$k = 1 + \frac{4P_0}{3B_0} \frac{\partial R_h}{\partial y} \quad (8.5)$$

Onde  $V_0$  é a velocidade média ( $m/s$ );  $B$  é a largura superior ( $m$ );  $P$  é o perímetro molhado ( $m$ );  $R_h$  é o raio hidráulico ( $m$ ); e  $Y$  é a profundidade do escoamento ( $m$ ).

Schuurmans et al. (1999), recomenda em caso de não disponibilidade de dados dados geométricos, que podem ser difíceis de se obter, estimar os parâmetros através de ajuste da resposta do modelo às medições: utilizando as medidas das taxas de fluxo nas condições de contorno, a resposta do modelo pode ser ajustada para medir níveis de água através de ajuste de parâmetros.

No ID o rio é considerado como uma combinação linear de um reservatório e uma defluência defasada. No entanto, não são capazes de reproduzir o comportamento dinâmico não-linear da hidráulica fluvial e não podem reproduzir efeitos complexos como amortecimento de oscilações de onda, efeitos de remanso e presença inercial de ondas ao longo do sistema.

## 8.3 SOBEK

SOBEK é um sofisticado sistema de modelagem numérica dinâmica para canais abertos. O sistema foi desenvolvido pela antiga WL|Delft Hydraulics, que atualmente chama-se Deltares, em parceria com o RIZA (*Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling*), que era o Instituto de Gestão de Águas Interiores e Tratamento de Águas Residuárias do governo Holandês (NOAA, 2007).

O nome SOBEK vem do deus-crocodilo do Antigo Egito que era associado ao rio Nilo. Os antigos egípcios acreditavam que os crocodilos podiam prever o futuro, já que botavam seus ovos exatamente acima do nível da próxima inundação do rio Nilo. O SOBEK é portanto compatível com o DELFT-FEWS (DELTARES, 2014).

O modelo pode ser aplicado para modelagem hidrodinâmica de rios, estuários e redes de drenagens em estudos como simulação de gerenciamento de recursos hídricos, prevenção de cheias, dimensionamento e projeto de canais, sistemas de irrigação, qualidade da água, navegação e dragagem. O *software* está equipado com a linha de comando do usuário (*user shell*) capaz de resolver equações que descrevem o fluxo não-permanente, intrusão salina, transporte de sedimentos, morfologia e qualidade da água. O software pode ser aplicado

Ele utiliza um método numérico que permite obter soluções para simulações complexas. Este software utiliza as equações unidimensionais hidrodinâmicas de Saint-Venant através deslocamento de malhas utilizando diferenças finitas implícitas.

O programa possui diversos módulos para aplicação à problemas relacionados de modelação hidrodinâmica e qualidade de água em rios. Seus módulos são: hidrologia, hidrodinâmica em canais, hidrodinâmica em rios, redes de águas pluviais e de esgoto, controle em tempo real, qualidade de água e previsão de enchentes. O programa permite representar os processos físicos e fenômenos em uma rede uni-dimensional (1D) e redes horizontais em duas dimensões (2D). O módulo de hidrologia do SOBEK possui uma biblioteca de modelos chuva-vazão incluindo o HBV, SAC-SMA (Sacramento) e o SCS-CN (*Soil Conservation Service – Curve Number*) (DELTARES, 2014).

Assim, o SOBEK consiste de um conjunto de módulos testados e validados, associados e integrados uns aos outros. Esses módulos representam fenômenos e processos físicos com precisão em sistemas unidimensionais e bidimensionais, são eles:

- Flow 1D Open Water;
- Flow 2D Overland;
- Rainfall Runoff Open Water;
- 1DMOR (incl. Transporte de Sedimentos);
- Water Quality 1D e 2D;
- Emission;
- Real Time Control.

O sistema de modelagem SOBEK apresenta três linhas: rural, urbana e fluvial. Todas utilizam a mesma interface sendo que as linhas rural e urbana estão totalmente integradas. As áreas de aplicação de cada uma delas e os correspondentes módulos integrantes são apresentados a seguir. SOBEK-Rural:

- Irrigação, reabilitação, modernização, drenagem e proteção de cheias;
- Operação de reservatórios em tempo real e a longo termo;
- Controle em tempo real e automatização de sistemas de canais;
- Incorpora os módulos hidrodinâmico, hidrológico, de qualidade da água e de controle de cheia em tempo real.

#### SOBEK-Urban:

- Determinação de estruturas de drenagem urbanas, incluindo plantas de tratamento;
- Análise de frequência de transbordamento de esgotos;
- Projetos de bacias de retenção e controle em tempo real de sistemas de drenagem urbanos;
- Estudos ambientais de águas cinzas;
- Incorpora os módulos hidrodinâmico, hidrológico e de controle em tempo real.

#### SOBEK-River:

- Navegação;
- Proteção e análise de risco de cheias;
- Estudo de poluição da água;
- Estudos sedimentológicos e morfológicos;
- Incorpora os módulos hidrodinâmico, de qualidade da água e morfológico.

No presente estudo, serão aplicados os módulos hidrológico e hidrodinâmico do SOBEK para as bacias e usinas do Grupo 2. São eles os módulos Flow 1D Open Water, Flow 2D Overland e Rainfall Runoff Open Water descritos a seguir.

O módulo Flow 1D Open Water trabalha com equações de Saint Venant, incluindo fluxo transiente e perfis de remanso. Nele podem ser modeladas seções transversais abertas e fechadas, perfis assimétricos e na direção y-z. Com o programa também é possível definir diferentes subseções em uma seção transversal utilizando formulações alternativas para coeficientes em cada subseção.

O módulo Flow 2D Overland consiste de um sistema de modelagem bidimensional baseado em equações de Navier-Stokes para fluxo de superfície livre integrado na vertical. Todas as equações são solucionadas através do método de diferenças finitas implícito, baseado num grid escalonado. No modelo, a maneira como os termos de momento convectivo são formulados permite a simulação de escoamentos sub e supercríticos e do comportamento de ressaltos hidráulicos. Para garantir maior robustez e acurácia aos resultados, não há necessidade de considerar a viscosidade artificial.

Em combinação com o sistema de modelagem 2D, o SOBEK consegue simular elementos unidimensionais como pequenos cursos d'água e estruturas hidráulicas. Saltos hidráulicos são simulados assim como canais com declividade moderada e escoamento subcrítico. Também é possível especificar qualquer tipo de estrutura hidráulica (bombas, barragens, comportas, galerias, eclusas e pontes de qualquer formato e tamanhos virtuais). Além disso, o modelo pode considerar sedimento depositado bloqueando parcialmente galerias e pontes. Várias opções de controle automático dessas estruturas estão disponíveis como padrão, incluindo controle de tempo e hidráulico. Os efeitos dos ventos sobre os níveis de água também podem ser modelados através da inserção de dados de velocidade e direção do vento como constantes ou séries temporais.

Nessa combinação 1D-2D, o fluxo superficial 2D, incluindo efeitos de terraplanagem ou diques naturais, é simulado através de equações 2D no módulo SOBEK - Overland Flow, enquanto que representações de cursos d'água menores, de grande declives, como barrancos, e de estruturas hidráulicas são simulados com o módulo de simulação unidimensional, SOBEK - Channel Flow.

Assim, o SOBEK 1D2D foi desenvolvido a fim de combinar o modelo de fluxo em canais (1D, equações de Saint Venant) com o modelo bidimensional de resolução de equações para águas superficiais. O modelo resolve equações de águas rasas a fim de simular vazões de cheia de inundações através da conservação da massa e do momento. As equações da continuidade e do momento considerando as direções  $x$  e  $y$  são apresentadas:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (8.6)$$

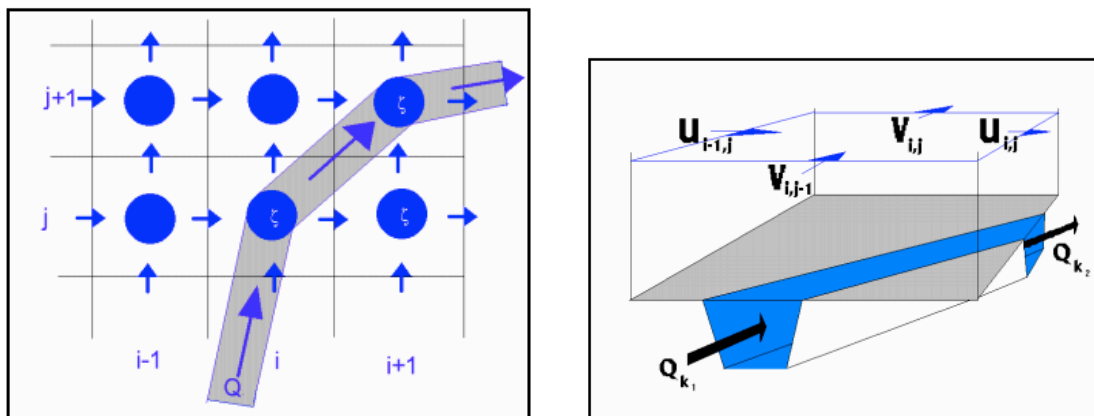
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + g \frac{u|V|}{C^2 h} + au|u| = 0 \quad (8.7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + g \frac{v|V|}{C^2 h} + av|v| = 0 \quad (8.8)$$

Onde  $\xi$  corresponde ao nível de água sobre o plano de referência (m);  $u$  é a velocidade na direção  $x$  ( $ms^{-1}$ );  $C$  é o coeficiente de Chezy ( $m^{1/2}S^{1/2}$ );  $V$  é a velocidade:  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$  ( $ms^{-1}$ );  $h$  é a profundidade total de água:  $\xi + d$  (m), com  $d$  igual à profundidade abaixo do plano de referência (m);  $a$  é o coeficiente de atrito ( $m^{-1}$ ).

Além das equações anteriores, são ainda utilizadas expressões para o cálculo das características de escoamento em estruturas como: pontes, passagens hidráulicas, sifões invertidos, orifícios, bombas, sifões e descarregadores. Nestas estruturas o escoamento depende dos níveis a montante e a jusante da estrutura, das suas dimensões e de um conjunto de parâmetros específicos de cada uma delas (PINHO; VIEIRA, 2006).

Dessa forma, ambos sistemas de modelagem produzem equações de diferenças finitas implícitas, e são acoplados através de uma formulação implícita para a articulação de equações de continuidade em locais onde compartilham pontos com mesmo nível de água (ASSELMAN; HEYNERT, 2003). A 19 mostra o esquema do modelo hidráulico para a configuração 1D/2D



(a) Combinação do grid 1D/2D

(b) Acoplamento da equação da continuidade para simulações 1D2D

Fonte: Asselman e Heynert (2003)

Figura 19 – Esquema do Modelo Hidráulico SOBEK.

Os módulos Overland Flow e Channel Flow do SOBEK são baseados nos mesmos princípios numéricos e ambos permitem cálculos extremamente estáveis e robustos. Isto é devido, primeiramente, às propriedades dos esquemas numéricos aplicados. Nesse mecanismo de simulação hidrodinâmica 1D/2D há um procedimento automático de alagamento e secamento 100 % conservativo. A cada passo de cálculo uma verificação é realizada a fim de prevenir resultados fisicamente não realísticos, como níveis de água negativos. Se essa restrição não é satisfeita, o passo de tempo é então reduzido.

O procedimento acima também é aplicado no caso de alagamento e secamento de células no módulo Overland Flow. A cada passo de tempo apenas uma célula vizinha pode ser alagada

ou seca, caso contrário, o passo de tempo será reduzido para satisfazer o critério. Além disso, a formulação implementada permite a supressão de direções aleatórias de vetores de velocidade em contornos irregulares. A verificação dos resultados pode ser realizada através da comparação com resultados de estudos experimentais, dados publicados e obtidos através de experimentos laboratoriais. A rigorosa conservação de volume é uma característica do modelo de particular interesse principalmente na simulação de transporte de poluentes.

O modelo oferece uma variedade de possíveis condições de contorno, como níveis de água ou descargas em função do tempo. As condições de contorno de descargas podem ser especificadas em um determinado número de células em função do transporte em cada célula individualmente. Nas fronteiras a jusante o usuário também pode especificar laços nas curvas chave, caso existentes. Condições iniciais podem ser dadas como fundo seco, profundidade de água ou nível de água. O modelo ajustará automaticamente o estado inicial correto de acordo com as condições de contorno inseridas. Uma função para início de simulação com condições de contorno e iniciais do modelo “pré-aquecido” também é disponível.

Ambos os módulos Overland Flow e Channel Flow permitem a consideração de efeitos meteorológicos, como vento, precipitação e evapotranspiração. Entretanto, no caso de simulação de um evento de cheia resultante do rompimento de um dique, esses processos podem ser negligenciados. Além disso, a variação espacial da rugosidade também é considerada nos dois módulos. A rugosidade hidráulica pode ser especificada por valores de Manning, Chézy ou White Colebrook. Cada célula do grid possui seu valor de rugosidade, que pode ser modificado através de importação por GIS ou através de um editor disponível na interface do usuário.

O módulo hidrológico do SOBEK (Rainfall Runoff Open Water) contém uma biblioteca de modelos chuva-vazão para pequenas e grandes bacias, como o HBV e o SCS. As áreas das bacias podem ser modeladas de maneira concentrada ou distribuída, sem restrições em relação ao número de bacias. O modelo permite calcular o escoamento instantâneo total, utilizando como dados de entrada a precipitação média na bacia e a evapotranspiração potencial. Nas simulações são considerados os diferentes usos de solo, altimetria e características de drenagem. O módulo utiliza eventos de precipitação e séries de dados meteorológicos para análise estatística. Há a possibilidade de utilizar diferentes padrões de precipitação ou dados históricos, além de considerar maior número de estações pluviométricas levando em consideração variações espaciais. Podem ser simulados tanto eventos de cheia quanto de seca. Este módulo pode ser aplicado em conjunto com o Flow 1D Open Channel e o RTC.

O módulo Rainfall Runoff Open Water é baseado no modelo de Sacramento. O modelo Sacramento divide o solo em duas camadas principais (PINHO; VIEIRA, 2006):

- A camada superior na qual ocorrem os processos rápidos junto à superfície do solo:

evaporação, percolação, escoamento superficial e escoamento sub-superficial;

- A camada inferior em que ocorrem os processos lentos da região não saturada do solo: transpiração, recarga do aquífero e escoamento de base.

Em ambas as camadas são consideradas subzonas onde a água está sob o efeito da tensão superficial (capilaridade) ou está sob o efeito da pressão hidrostática (água livre). O mecanismo básico do modelo pode ser resumido do seguinte modo: a água é armazenada numa determinada porção da coluna do solo como água sob tensão superficial, até que a capacidade deste reservatório seja atingida. A partir daí, toda a água adicionada ao sistema será armazenada como água livre.

O volume de água sob tensão superficial só pode ser diminuído com a percolação da camada superior para a camada inferior, escoamento sub-superficial, escoamento de base e recarga do aquífero. A vazão instantânea total é composta por fluxos provenientes de processos que ocorrem nas sub-zonas de água livre das camadas superior e inferior:

- Escoamento direto: proveniente da chuva que cai sobre a fração impermeabilizada da bacia, apresentando uma resposta hidrológica à escala de horas;
- Escoamento superficial: proveniente da chuva quando a camada superior do solo estiver saturada, apresentando uma resposta hidrológica à escala de horas;
- Escoamento sub-superficial: função do grau de saturação parcial da subzona de água livre da camada superior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de dias;
- Escoamento de base primário: proveniente da subzona de água livre primária da camada inferior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de semanas ou meses;
- Escoamento de base suplementar: proveniente da subzona de água livre suplementar da camada inferior, apresentando uma resposta hidrológica à escala de dias a semanas.

Assim, o modelo é composto por uma série de reservatórios com capacidades pré-determinadas, interligados por processos que permitem a quantificação das condições de umidade do solo, as quais controlam a produção do escoamento fluvial. A medida que ocorrem eventos de precipitação estes reservatórios são preenchidos. O esvaziamento ocorre por percolação, evaporação ou drenagem lateral. Além disso, no modelo divide-se a área da bacia em regiões permeáveis e impermeáveis.

Pinho e Vieira (2006) definiram o seguinte fluxo de trabalho para a aplicação do SOBEK para a modelagem hidrológica, hidrodinâmica e de qualidade da água utilizada no desenvolvimento de um Sistema de Suporte à Decisão para a gestão da água no Empreendimento de

Fins Múltiplos de Alqueva: preparação de mapa auxiliar à discretização espacial; criação de nós adequados à simulação das estruturas hidráulicas e fronteiras; estabelecimento das ligações inter-nodais (por terem sido aplicados modelos unidimensionais, foram considerados nós em pontos em que existem estruturas hidráulicas, nas fronteiras e nos limites de trechos em que ocorrem variações de seção transversal); definição das seções transversais; e definição de vários conjuntos de dados relativos à simulação (duração, condições iniciais, parâmetros associados ao método numérico utilizado). No estudo, o sistema modelado compreendeu as bacias hidrográficas, os reservatórios, os canais e os principais cursos de água.

## 8.4 MGB-IPH

O MGB-IPH (Modelo de Grandes Bacias – do Instituto de Pesquisas Hidráulicas) é um modelo hidrológico utilizado para estimar o balanço hídrico, evapotranspiração e propagação de fluxo a partir de células e linhas de fluxo através da rede de drenagem gerando simulações em escala temporal diária ou sub-diária (horas). A bacia de drenagem é dividida em blocos quadrados formados por uma combinação de características quanto ao uso e ocupação, vegetação e solo e contendo três reservatórios (água superficial, água sub-superficial e subterrâneo).

Este modelo hidrológico distribuído desenvolvido para modelar para bacias de grande escala utiliza Muskingum-Cunge Não Linear (NLMC) como equação governante, que é apropriado para aplicações de grande escala (COLLISCHONN et al., 2007; PONTES; COLLISCHONN, 2012). Este modelo hidrológico estima as descargas através do cálculo do escoamento superficial de acordo com o tipo de solo, usos e ocupação do solo dentro da bacia hidrográfica, os quais são novamente classificados utilizando Unidades de Resposta Hidrológica ou HRU (*Hydrology Response Units*) e para a evapotranspiração o MGB utiliza equações de Penman-Monteith (KOUWEN et al., 1993). Para aplicações de previsão em tempo real a escala temporal de simulação geralmente usada é a escala horária.

O modelo utiliza o modelo Xinanjiang para o balanço hídrico do solo, o método de Muskingum-Cunge para a propagação de fluxo e a equação de Penman-Monteith para calcular a evapotranspiração (COLLISCHONN et al., 2007).

Este modelo apresenta uma grande potencialidade de ser aplicado em bacias hidrográficas de grande escala, com base de dados escassos, como é a maioria dos casos encontrados no América do Sul, bacias com grandes áreas e com poucas estações de monitoramento hidrológico distribuídas no território e com mapas disponíveis com relativa baixa resolução. O modelo foi empregado em diversas regiões do Brasil, bem como outros países da América Latina como Paraguai, Bolívia, Peru e Argentina, sendo também aplicado na bacia do Rio Grande para predição de vazão a curto e longo prazo para planejamento operacional de sistemas de geração hidrelétrica, obtendo resultados satisfatórios a curto prazo com erros de 10% a 20% menores que



o modelo estocástico atualmente empregado, porém sendo necessários melhorias nos “ensembles” de predição climatológica.

#### 8.4.1 Muskingum-Kunge

Chanson (2004) afirma que este método tem sido desenvolvido desde 1938, quando foi originalmente proposto por McCarthy e ampliado em 1969 com a adição de cálculo de contribuição lateral resultando no Método Não-Linear de Muskingum-Cunge (NLMC), em que a vazão é calculada em cada passo de tempo e, assim, os parâmetros  $\kappa$  e  $\varepsilon$ , são atualizados e mudam ao longo do tempo e de acordo com a descarga.

$$s = \kappa[\varepsilon I + Q_{out}(1 - \varepsilon)] \quad (8.9)$$

Os parâmetros  $\kappa$ ,  $\varepsilon$ ,  $I$ ,  $Q_{out}$ , definem respectivamente coeficiente de armazenamento, fator de peso, a taxa de vazão afluente para o corpo d’água, taxa de vazão defluente do corpo d’água. A diferença infinita é formulado por:

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^n + C_2 Q_j^{n+1} + C_3 Q_{j+1}^n \quad (8.10)$$

Onde  $n$  é o tempo sobrescrito,  $j$  é o espaço subscrito,  $Q$  é vazão, e  $t$  é o incremento de tempo de encaminhamento da célula de diferenças finitas.

## 8.5 SPRNT

SPRNT é acrônimo para (*Simulation Program for River Networks*), este modelo é uma ferramenta dinâmica de simulação de redes fluviais. Sendo capaz de solucionar redes complexas de canais de rios atarvés da forma totalmente dinâmica das ESV. Ao contrário de outros softwares de modelagem rio, SPRNT foi concebido como um "motor", não fornecendo uma interface de usuário. A idéia dos desenvolvedores deste modelo é de que o SPRNT seja utilizado como uma rotina interna de programas de simulação de redes fluviais como uma rotina de cálculo para simulações.

A configuração das redes de canais, termos forçantes e condições de contorno são todos especificados em um único arquivo-texto chamado "*netlist*". Os resultados da simulação também são salvos em um arquivo de texto com base em texto, e portanto deverá ser lido e plotados por qualquer *software* de visualização científica como MATLAB, Scilab, etc.. ou Integrado em Programas com Interface gráfica embutida como OpenFOAM, OpenMI, Delft-FEWS, etc.. o que poderá ser feito com relativa facilidade por modeladores e programadores.

Liu e Hodges (2014), apresentam o modelo SPRNT, como sendo um modelo hidráulico capaz de resolver grandes redes complexas de rios com mais de  $10^3$  elementos. O modelo conseguiu solucionar uma rede com  $10^5$  elementos 330 vezes mais rápido que tempo real utilizando um computador pessoal. O modelo incorpora técnicas de aceleração para solucionar a equação de Saint-Venant.

O modelo incorpora conceitos originalmente utilizados para resolver integração de Sistemas Muito Grandes (VLSI -Very large System Integration), que são usados em problemas de projeto de microcomputadores. Neste modelo toda rede fluvial é simulada como uma única partição como uma matriz.

O SPRNT soluciona a forma não conservativa das ESV, realizando as seguintes operações:

- I. Verificação topológica e da conectividade da rede de rio, bem como a especificação apropriada dos termos forçantes e condições de contorno;
- II. Solução de escoamento estacionário do sistema de equações de Saint-Venant, para calcular as condições iniciais corretas;
- III. Solução do escoamento não estacionário com variação do intervalo de tempo dos termos forçantes e condições de contorno.

Por ser estruturado para servir como motor para realizar os cálculos, ele também pode ser utilizado através de um conjunto de API (*Application Programming Interface*). Através da API, outro modelo pode ser utilizado para construir as redes fluviais, especificar os termos forçantes e condições de contorno, bem como executar soluções estáveis e instáveis. O SPRNT pode ser executado também no padrão *go-stop-go-stop*, e desta forma pode ser integrado a outros modelos, como um modelo hidrológico ou um modelo Chuva-Vazão (LIU, 2014).

## 9 Delft-FEWS

O desenvolvimento de sistemas de alerta de previsão de enchentes é um elemento essencial tanto para o planejamento regional quanto para o nacional. Recentemente desenvolvimentos na previsão numérica climática, dados de radares meteorológicos e aquisição de dados hidrológicos e meteorológicos on-line resultaram em um crescente interesse em processamento de importação e dados de dados.

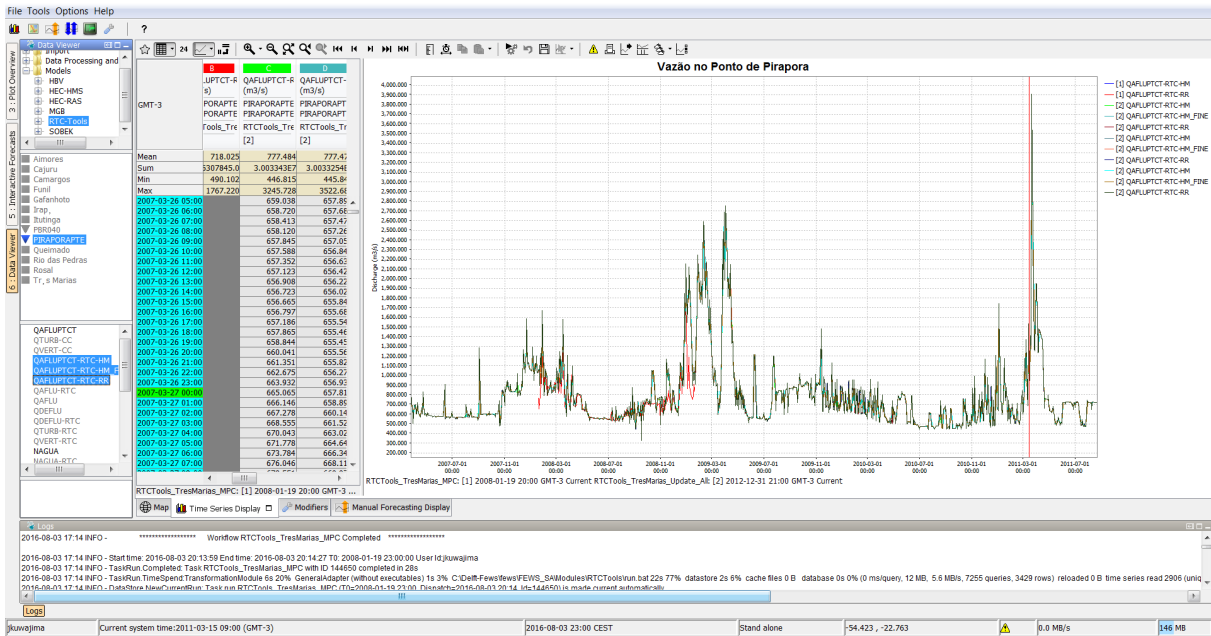
Delft-FEWS é uma plataforma de manipulação de dados aberto que foi inicialmente desenvolvido como um sistema para previsão e alerta de inundações. Essencialmente, é uma coleção sofisticada de módulos projetados para a construção de um sistema de previsão hidrológica personalizado para as necessidades específicas de uma organização individual. É um sistema moderno de alerta e previsão de inundações com integração de grandes conjuntos de dados, módulos especializados para processar os dados e interfaces abertas para permitir a fácil integração das capacidades de modelação existentes (Figura 20).

O software Delft-FEWS da Deltares representa um avanço em sistemas de previsão hidrológica e sistemas de alerta, introduzido em 2002/2003, ele permitir a criação e customização de modelos e sistemas através da integração de extensos conjuntos de dados e módulos especializados de processamento de dados e uma interface que permite a simulação em tempo real e a fácil integração dos modelos existentes permitindo adaptação dos modelos e sistemas conforme as necessidades de cada projeto específico. Esta abordagem modular garante maior flexibilidade de integração de novos modelos e algoritmos ao código-fonte, não sendo necessária extensa reprogramação para realizar modificações no mesmo (WERNER et al., 2013).

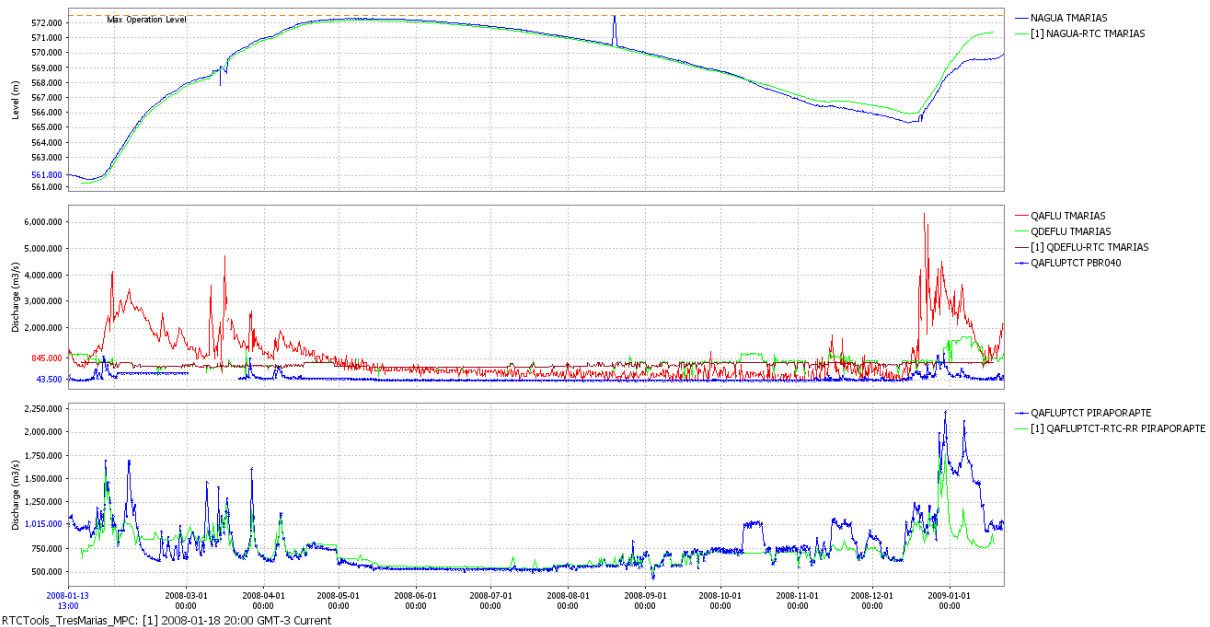
O sistema é “*Open Shell*” que permite ao usuário liberdade para gerenciar os dados e processos de previsão e de escolher o modelo hidrológico que melhor se adapte a suas necessidades. Este software incorpora uma extensa biblioteca de utilitários para gerenciamento de dados permitindo que uma vasta gama de modelos externos de previsão possam ser integrados ao sistema através de uma interface aberta.

Com uma natureza modular e altamente configurável é possível aplica-lo tanto em sistemas simples quanto em complexos e é adaptável para diversas aplicações incluindo previsão de enchentes, previsão de qualidade de água, gerenciamento de aquíferos, aplicações para controle em tempo real ou simplesmente como um banco de dados (DELTARES, 2012).

Para permitir o gerenciamento de grandes quantidades de dados, o sistema fornece uma série de utilitários genéricos para permitir o suporte automatizado de tarefas como integração de



(a) Interface Gráfica de Usuário



(b) Visualização de Resultados

Figura 20 – Interface Gráfica de Resultados no Delft-FEWS.

dados, validação e troca de informações. A verificação da consistência de dados externos é feita através da validação e opções de interpolação de dados por preenchimento de lacunas. Existem também ferramentas para correção de discrepâncias espaciais e temporais.

Na Figura 21 podemos visualizar os diferentes componentes do sistema. O centro de banco de dados forma o coração do sistema de previsão desta plataforma. Este núcleo serve para o gerenciamento de séries temporais de dados tanto para escalas de tempo equidistantes quanto não-equidistantes com representação em pontos, vetor, raster ou poligonal. Conforme demonstrado na mesma figura todos os componentes comunicam entre si através desta central de base de dados através de comandos de armazenamento ou busca de dados sendo gerenciados por um módulo intermediário de acesso de dados, que permite ao sistema possuir uma independência em relação a implementação de banco de dados físicos. Atualmente o sistema utiliza o gerenciador de banco de dados Microsoft Access, Firebird para banco de dados locais e Oracle PostgreSQL ou servidor SQL como servidor para o banco de dados central em um sistema cliente-servidor (WEERTS; SCHELLEKENS; WEILAND, 2010).

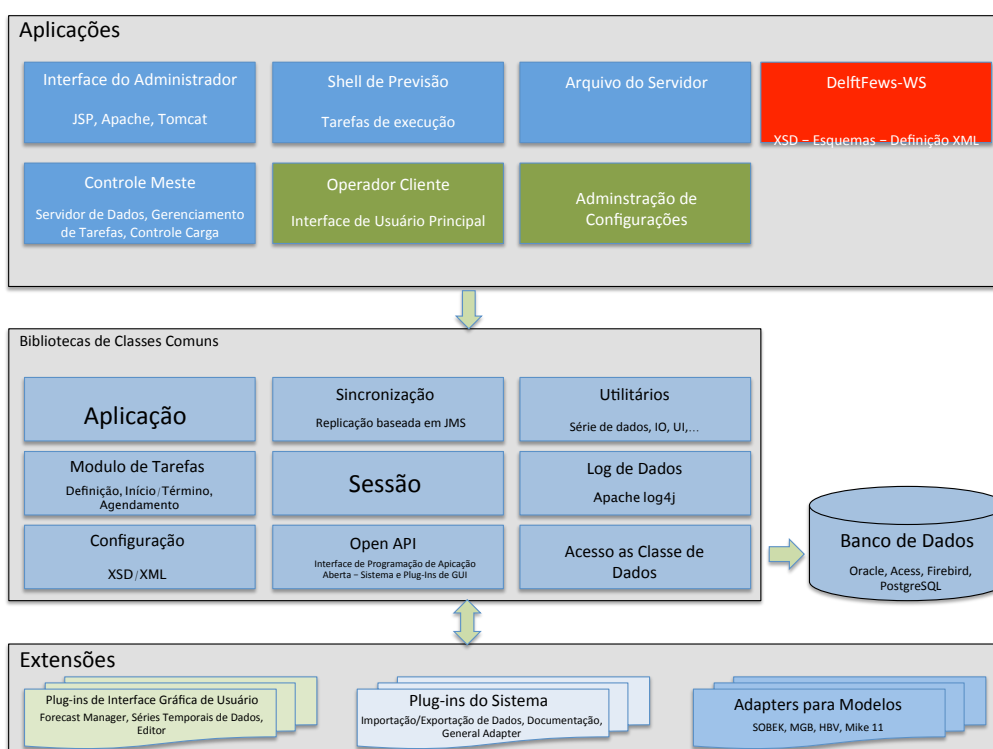


Figura 21 – Esquema da arquitetura do sistema de previsão Delft-FEWS.

Fonte: Adaptado de Weerts, Schellekens e Weiland (2010).

A comunicação entre o sistema de previsão e bancos de dados externos é feita através de módulos de importação e exportação, que incluem importação de previsões numéricas de clima NWP (Numerical Weather Predictions) e modelos meteorológicos de grande escala utilizando

formatos padrões suportados pelas agências meteorológicas (GRIB, GRIB2 ou NetCDF-cf). Existe um módulo que permite os sumários e os resultados das previsões possam ser distribuídos via internet/intranet através de arquivos HTML/XML.

A plataforma apresenta uma vasta gama de modelos que podem ser incorporados a ela conforme o projeto específico; para facilitar a integração e comunicação entre eles uma interface define como esta troca de dados, escalas de tempo, estados e parâmetros será feita através de arquivos formatados XML. Para cada módulo incorporado ao sistema há necessidade de desenvolver um módulo de adaptação para implementar este padrão de comunicação via arquivos XML (Figura 22).

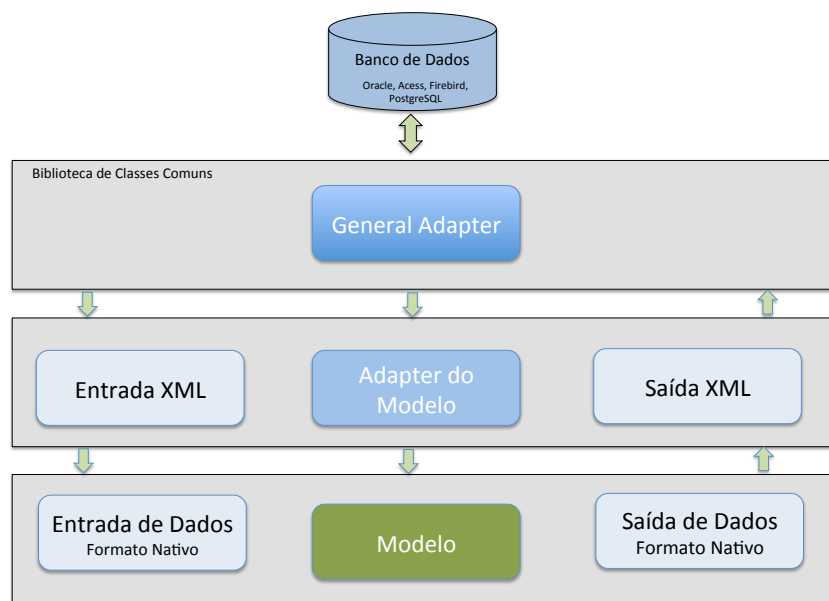


Figura 22 – Comunicação entre os modelos e a interface Delft-FEWS.

Fonte: Adaptado de Weerts, Schellekens e Weiland (2010).

Atualmente o código fonte do Delft-FEWS ainda não se encontra totalmente aberto, embora muitos módulos de interface sejam “open source”, o código fonte do núcleo do sistema não está disponível. Espera-se, que assim que o desenvolvimento e gerenciamento de processos que atendam os requisitos operacionais para agências de previsão estiver completamente implementado, possa garantir a estabilidade do software e disponibilizar o código fonte (WERNER et al., 2013).

Atualmente existem aproximadamente 60 modelos compatíveis para esta plataforma entre eles modelos de Chuva-Vazão, Hidrodinâmicos, Propagação de cheias, Aquífero, Infiltração, Escoamento sub-superficial, de Simulação de reservatórios e de Operação em tempo real. Entre estes modelos destacam-se o RTC-Tools e o SOBEK.

Na configuração de pesquisa utilizou-se o Delft-FEWS para integrar os bancos de dados de entradas dos modelos utilizados (SOBEK, MGB-IPH e RTC-Tools), e compartilhar dados de saída. Como o SOBEK e RTC-Tools são modelos exclusivamente hidráulicos, as vazões incrementais e e laterais serão calculadas pelo MGB-IPH. O modelo hidrológico serve como espinha dorsal do SSD, fornecendo dados de entrada para os demais modelos. O esquema desta integração está representado na Figura 23.

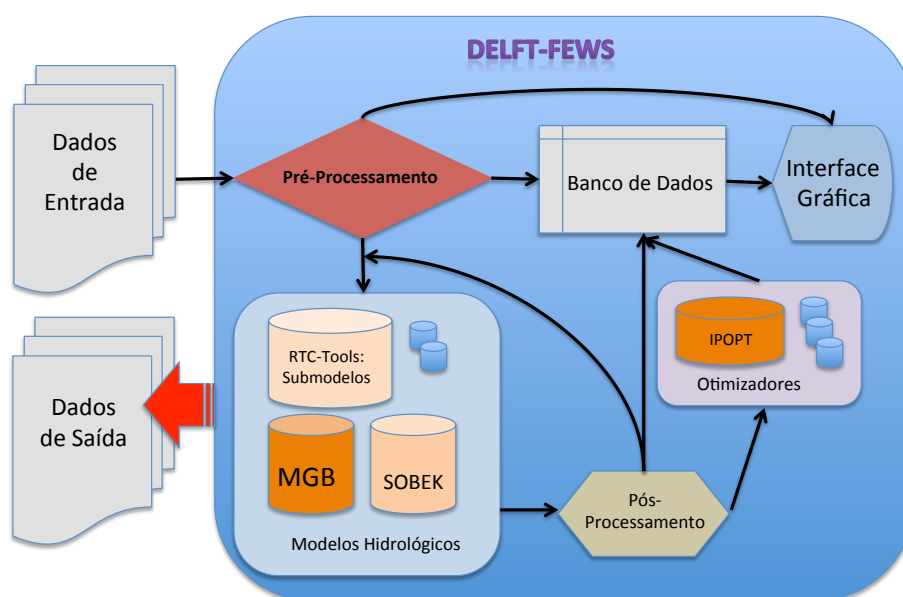


Figura 23 – Esquema da Arquitetura de Integração dos Modelos no Delft-FEWS.

O Delft-FEWS é um sofisticado sistema composto por um conjunto de módulos que podem ser utilizados em cadeia a fim de construir um sistema operacional de gestão de recursos hídricos adaptável às necessidades individuais de cada agência (GIJSBERS, 2010). O sistema foi elaborado com o objetivo de possibilitar a manipulação e a conexão de uma grande variedade de dados hidrometeorológicos, tanto previstos como monitorados, assim como modelos hidrológicos e hidráulicos. Mais do que um suporte para tomada de decisões estratégicas, o Delft-FEWS forma uma classe especial de sistemas de suporte a decisões ambientais, tendo em vista que funciona em tempo real (MATTHIES; GIUPPONI; OSTENDORF, 2007). A aplicação do sistema se estende desde pequenas escalas, utilizando uma estação de trabalho em um computador de mesa, a grandes escalas, como num sistema de previsão de cheias nacional utilizando tecnologia cliente-servidor distribuída

Uma grande vantagem trazida pelo modelo é que o sistema provê uma plataforma através

da qual sistemas operacionais de previsão podem ser construídos, o que gera flexibilidade na integração dos modelos e dados. Entretanto, cabe ressaltar que o Delft-FEWS não contém recursos de modelagem hidrológica em seu código base.

Refletindo sobre a interação entre sistemas de previsão e processos de alerta, de acordo com Haggett (1998), os elementos chave dos sistemas de previsão de vazões e alertas de enchente podem ser descritos em quatro passos:

- Detecção;
- Previsão;
- Disseminação e alerta;
- Resposta;

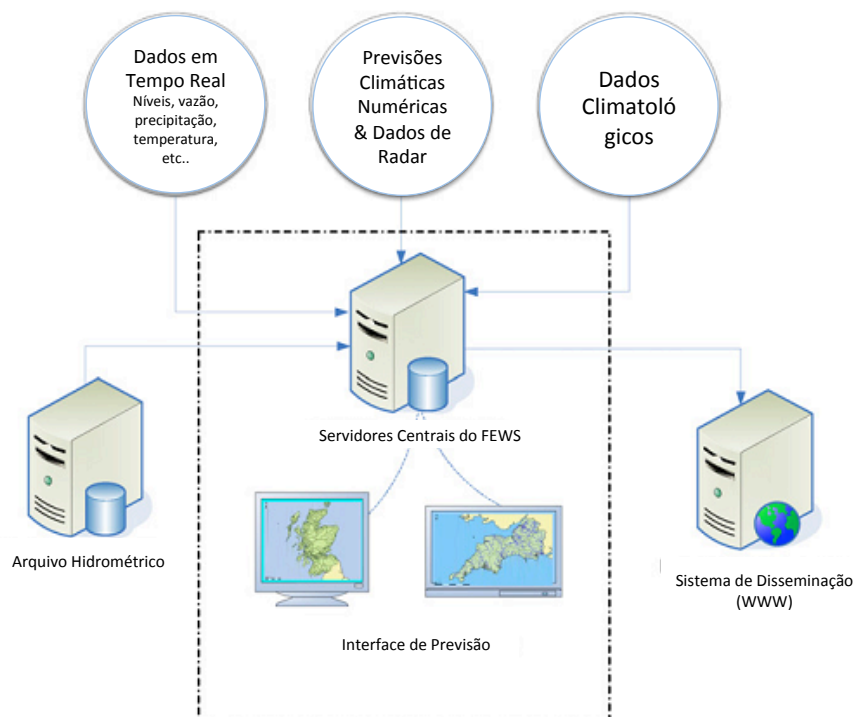


Figura 24 – Estrutura esquemática do sistema de previsão de cheias integrando bancos de dados e modelos dentro do Delft-FEWS.

Fonte: Adaptado de Werner et al. (2013).



Assim, seguindo esses passos, o Delft-FEWS localiza-se no segundo, previsão. Dentro do passo de previsão, modelos hidrológicos e hidráulicos podem ser utilizados para realizar as predições, portanto, o sistema de previsão necessita funcionar como suporte para o funcionamento desses modelos em tempo real. Além disso, os sistemas de previsão necessitam suportar a entrada e atualização de dados, por meio dos quais os resultados dos modelos preditivos são atualizados a fim de reduzir as margens de erro (MADSEN et al., 2000 apud WERNER et al., 2013)<sup>1</sup>. A Figura 24 apresenta a estrutura esquemática de um sistema de previsão de cheias mostrando a posição do Delft-FEWS e a interação com os outros sistemas primários dentro do ambiente operacional.

## 9.1 Estrutura do Delft-FEWS

Sistemas operacionais de previsão de cheias têm sido desenvolvidos e aplicados em centros de previsão por muitos anos. Particularmente nos casos em que têm sido aplicados por longos períodos de tempo, nota-se uma centralização no uso específico de um modelo e de seus dados de entrada. Entretanto, há algumas desvantagens no uso de sistemas de suporte a decisões que contém uma estrutura fixa e definição rígida dos processos de entrada e saída face à possibilidade de futuras alterações, sejam elas em relação ao modelo ou aos dados a serem utilizados para realização das previsões.

Atendendo a essa demanda, o Delft-FEWS foi elaborado, segundo Rizzoli et al. (2008), abandonando o conceito de aplicações de modelagens monolíticas em favor da adoção da modelagem em componentes construídos em blocos bem definidos, o que garante flexibilidade. Assim, mais do que centrado em modelos, o Delft-FEWS tem como foco central os dados e o processamento dos mesmos. Dessa forma, com as mudanças necessárias nos sistemas operacionais de previsão, o design do Delft-FEWS segue o conceito descrito por Argent et al. (2009), no qual ele provê um software através do qual o sistema de previsão pode ser desenvolvido atendendo os requisitos específicos de um centro operacional de previsão.

Todos os componentes do sistema se comunicam através de uma base de dados central que requer que a aquisição e o armazenamento dos dados sejam realizados por um módulo de acesso. O foco dessa base de dados está na manipulação de séries temporais de dados, com passos de tempo que podem ser iguais ou não, em formato de ponto, vetor, *raster* ou polígono.

O uso de um módulo intermediário de acesso aos dados permite que o sistema seja independente de uma implementação física de uma base de dados. Em relação a este tópico foram realizadas algumas implementações recentes no sistema, tais como: inclusão de bases de dados do Microsoft Access e Firebird para a base de dados local, e Oracle PostgreSQL ou

<sup>1</sup> MADSEN, H. et al. Data assimilation in rainfall runoff forecasting. In: *4th Hydroinformatics Conference*. Cedar Rapids, Iowa: [s.n.], 2000.

SQL Server para a base de dados central no sistema cliente servidor. Apesar de diversos módulos utilizados pelo modelo apresentarem-se abertos, o código base não possui acesso aberto. Alguns aprimoramentos recentes foram realizados no sistema, conforme segue (VERWEY et al., 2006):

- Maior abertura para o processamento dos dados de precipitação, incluindo modelagem climatológica, produtos gerados por radares e satélites;
- Maior abertura para a inclusão de uma variedade de sistemas de modelagem hidrológicos e hidráulicos calibrados. Dentre os modelos que já podem ser utilizados no acoplamento genérico, estão: Sacramento, NAM, LISFLOOD, HBV, SOBEK, Mike11, ISIS e HEC-RAS;
- Partes do sistema foram reprogramadas utilizando a tecnologia Java™ a fim de facilitar a instalação em plataformas independentes para diferentes sistemas operacionais;
- Maior facilidade da configuração do sistema em satisfazer requerimentos específicos de cada configurador através da utilização de formatos de arquivos configurados em XML (eXtensive Markup Language);
- Maior desenvolvimento de ferramentas que permitem acesso a tabelas, indicadores de performance, ferramentas de calibração genérica do modelo, aplicativos de mapeamento de enchentes e simulação de cenários alternativos.

A linguagem de marcadores XML foi elaborada para descrever e estruturar dados. O XML é um padrão de armazenamento de dados em um formato de texto simples, o que significa que pode ser aberto em qualquer computador. Uma das características mais importantes da linguagem XML é que ela não apresenta número máximo de marcadores, podendo ser expandida.

### 9.1.1 Importação, armazenamento, processamento e manipulação dos dados

Em relação à importação e ao armazenamento de dados, na maioria dos sistemas operacionais, dados de diferentes fontes são utilizados, com diferentes formatos para armazenamento e publicação dos mesmos. Sendo assim, Delft-FEWS provê um módulo de importação de dados que foi concebido a fim possibilitar a manipulação de uma gama de dados em formatos diferentes, através de uma classificação em JAVA desenvolvida para formato de dados (DELTARES, 2012).

Muitos dos atuais conceitos de armazenamento e manipulação de dados no Delft-FEWS foram implementados na primeira versão do modelo, desenvolvida dentro do escopo de um projeto de pesquisa europeu (ROO et al., 2003). Os conceitos desses sistemas predecessores foram refinados e combinados com a presente versão do Delft-FEWS (segunda versão). A corrente versão do Delft-FEWS foi iniciada com o estabelecimento do Sistema Nacional de

Previsão de Cheias da Inglaterra e País de Gales (National Flood Forecasting System in England & Wales). Esta segunda versão estabeleceu por completo a abertura para integração entre modelos e dados. Cabe ressaltar que o desenvolvimento do sistema tem sido muito dinâmico em vista de encontrar aplicação em um número crescente de sistemas operacionais de previsão. Assim, novos desenvolvimentos no sistema têm sido realizados de acordo com o aparecimento de necessidades de funcionalidades adicionais às novas aplicações.

Nesse contexto, a adoção de um mesmo formato de dados por parte de todas as agências fornecedoras proporciona redução do tempo dispendido para elaboração de novos códigos em JAVA. Uma vez analisados, os dados são armazenados na base de dados do Delft-FEWS. Esta base contém dados de configuração, incluindo informações de localização específica (coordenadas e outras propriedades), e séries dinâmicas de dados, que podem ser importadas de fontes externas. Dentro do Delft-FEWS as séries temporais são identificadas pela localização e tipo de dados, assim como um identificador da fonte dos dados.

Grande parte dos dados não está em escala temporal e espacial adequada para serem utilizados diretamente como entrada nos modelos preditivos. Como consequência, o processamento de dados constitui uma das etapas que requer maiores esforços e consome grande quantidade de tempo. Para a realização da manipulação dos dados, o sistema é equipado com uma extensa biblioteca de funções e processamento de dados, que incluem algumas funções hidrológicas específicas. As ferramentas de transformação de dados incluem métodos para agregação ou desagregação temporal, avaliação de equações simples e de funções hidrológicas simples assim como transformação de altura do nível de água em vazões através da curva-chave e cálculo de evapotranspiração (WERNER et al., 2013).

Os aplicativos do sistema incluem:

- Controle de qualidade dos dados de precipitação importados da base de dados hidrológicos em tempo real;
- Agregação dos dados em intervalos de 15 min à intervalos horários;
- • Interpolação dos dados utilizando polígonos de Thiessen;
- Obtenção de taxa de precipitação através de imagens de radar;
- Obtenção de dados através do grid numérico;
- Correção da hidrografa gerado pelo modelo hidrológico através do algoritmo de correção de erro (ARMA);
- Dimensionamento da hidrógrafa para pequenos tributários não abrangidos pelo modelo, o que provê as condições de contorno de jusante para a o modelo hidrodinâmico.

Grande parte das funções é aplicável a séries de dados em formato escalar ou matricial. Para operações espaciais complexas o sistema não possui recursos em seu código base, porém utiliza uma integração incorporada com a ferramenta de processamento espacial PCRaster.

Para o caso de necessidade de novas funções, novos algoritmos podem ser construídos e utilizados pelo sistema desde que o código em JAVA esteja incluído no aplicativo de interface de programação.

### 9.1.2 Integração de Modelos

Segundo Werner et al. (2013) o Delft-FEWS disponibiliza os dados de entrada e parâmetros, executa o modelo (hidrológico e/ou hidrodinâmico) e lê os resultados. Entretanto, devido a grande variedade de modelos que podem ser integrados, o sistema muitas vezes pode estar sujeito a erros ocasionados pela má interpretação dos dados e parâmetros. Para reduzir essa complexidade, o Delft-FEWS se utiliza de uma interface em XML através da qual toda comunicação entre os modelos é realizada.

Todos os modelos que têm sido integrados com o Delft-FEWS estão atualmente sendo executados em sistemas operacionais que seguem o conceito de interfaces XML independentes para modelos externos. O Delft-FEWS gera os dados de entrada como um conjunto de arquivos XML, um adaptador desenvolvido especialmente para o modelo em questão transforma os dados para um formato próprio para a realização da etapa de pré-processamento dos mesmos; o Delft-FEWS executa o modelo; e então o adaptador transforma novamente os dados no formato XML na etapa de pós-processamento. Subsequentemente os resultados são importados para a base de dados no formato XML. É o adaptador que permite que quaisquer modelos possam ser utilizados pelo Delft-FEWS (DELTARES, 2012).

O passo final no processo de previsão é a geração de produtos que podem ser divulgados num sistema de alerta. O Delft-FEWS pode gerar resultados na forma de gráficos, tabelas assim como resumos dos mesmos. Estes valores podem ser inseridos em base de mapas para permitir a visualização geográfica dos principais resultados. Os produtos gerados pelo sistema podem conter tanto previsões determinísticas quanto probabilísticas. Atualmente informações probabilísticas têm adquirido maior importância na disseminação dos resultados. No sistema, elas podem ser geradas em gráficos e tabelas, sumários estatísticos assim como probabilidade de excedência de valores estabelecidos.

Segundo Werner et al. (2013), nenhum dos módulos funcionais do Delft-FEWS tem acesso direto aos dados a não ser pela interface própria para tal, assim como não há comunicação direta entre os modelos. Cada passo realizado no processo de previsão é agrupado em um fluxo de trabalho, que simplesmente lista a sequência dos mesmos na ordem em que devem ser executados.

Um exemplo de fluxo de trabalho pode ser visto na Figura 25.

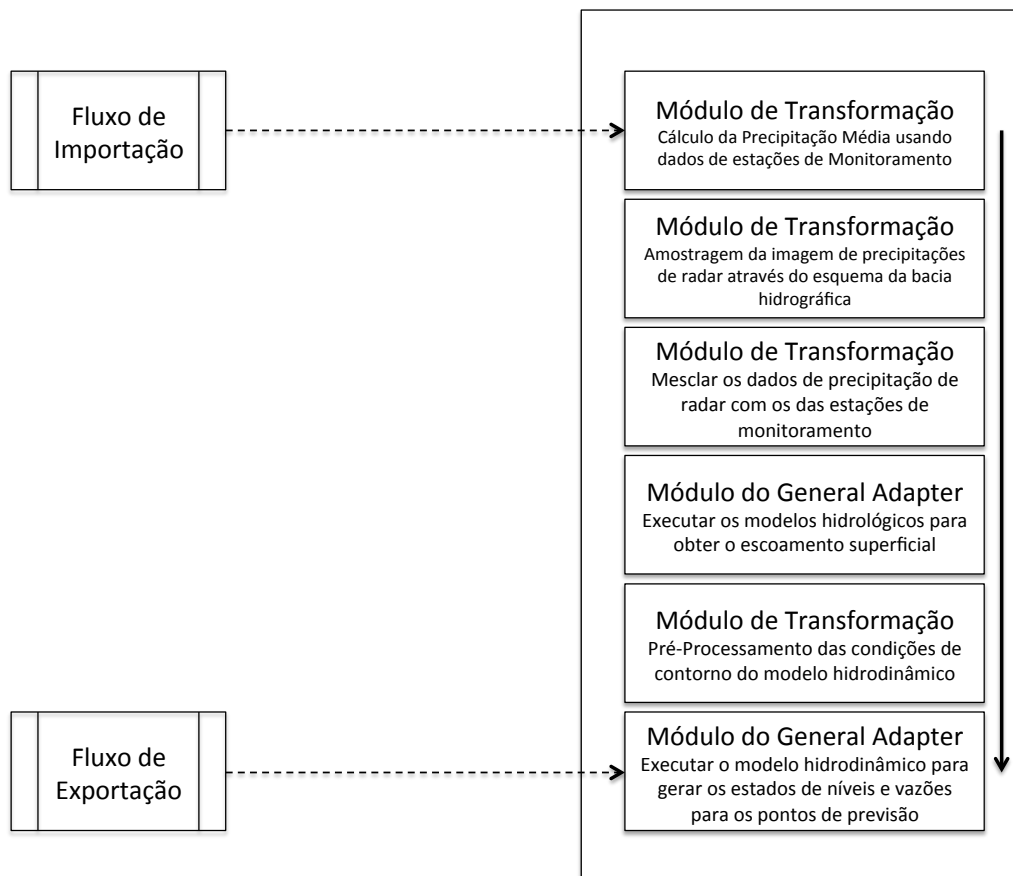


Figura 25 – Exemplo de um *Workflow* (fluxo de trabalho) mostrando o processo de previsão para uma simulação hidrodinâmica de uma bacia hidrográfica.

Fonte: Adaptado de Werner et al. (2013).

Conforme anteriormente citado, a configuração do Delft-FEWS é definida por um grupo de arquivos XML. Inicialmente, a configuração do sistema é composta por um conjunto de diretórios, cada um contendo diferentes partes da mesma. Depois, a configuração do modelo fica inteiramente contida no banco de dados local como um conjunto de tabelas, cada uma refletindo um dos subdiretórios da configuração inicial. Assim, quando iniciado, o Delft-FEWS procura pelas configurações contidas no diretório local, e quando não encontradas, ele procura dentro do banco de dados. No sistema em operação o conteúdo da base de dados será sincronizado entre todos os operadores e os servidores dos modelos de previsão, sendo assim, é esperado que seja igual em todas as partes do sistema (DELTARES, 2012).

Além da parte sincronizada da configuração, há ainda os arquivos de configuração de raiz, que são únicos para cada cliente operador e/ou para a linha de comando do servidor do sistema de previsão.

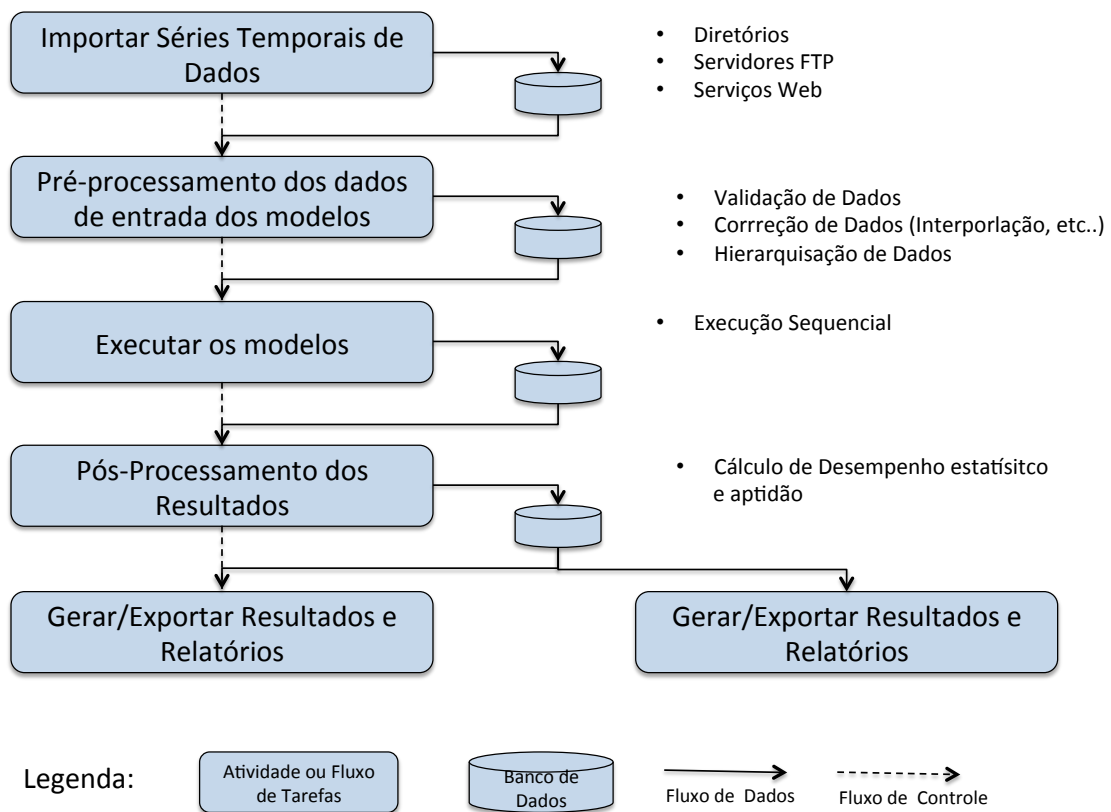


Figura 26 – Exemplo de um *Workflow* (fluxo de trabalho) mostrando os processos para a simulação.

Fonte: Adaptado de (GIJSBERS, 2010).

## 10 Estudo de Caso: Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco

Neste capítulo serão tratadas as peculiaridades da bacia hidrográfica usada para avaliar a performance computacional e as potencialidades dos modelos hidrológicos propostos para uso na operação de reservatórios. Serão também abordados as características hidrológicas da bacia, bem como as características e restrições operativas da UHE-Três Marias.

A previsão de vazões afluentes e a operação do aproveitamento de Três Marias são relevantes no processo de operação dos demais reservatórios da bacia do rio São Francisco, localizados a jusante deste reservatório, uma vez que as afluências naturais a este aproveitamento representam cerca de 26% das afluências desse mesmo rio São Francisco e que, tais processos, interferem nas definições de estratégias energéticas para o Subsistema Nordeste (ONS, 2009a).

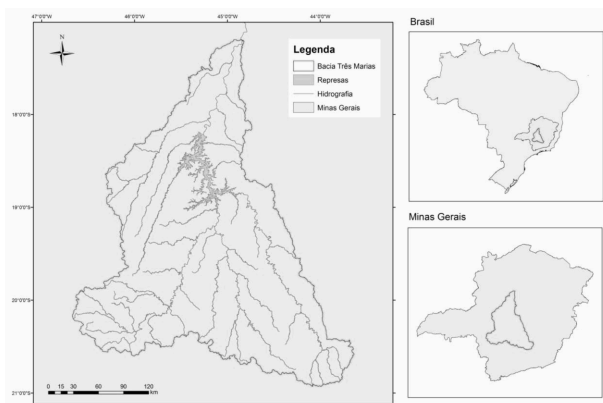
O reservatório de Três Marias localiza-se na região do Alto São Francisco, entre os paralelos 18° e 21° de latitude sul e os meridianos 43°30' e 46°40' oeste de longitude no estado de Minas Gerais (Figura 01), em uma zona climática tropical. A área estende-se desde as cabeceiras, na Serra da Canastra, município de São Roque de Minas, até a cidade de Pirapora (MG), abrangendo as sub-bacias dos rios das Velhas, Pará e Indaiá, além das sub-bacias dos rios Abaeté e Jequitaiá.

As unidades geomorfológicas existentes na bacia do Alto São Francisco são o Planalto Dissecado do Centro-Sul e Leste de Minas, a Depressão São Franciscana, o Planalto do São Francisco, o Quadrilátero Ferrífero e a Serra do Espinhaço. O Alto São Francisco apresenta topografia ligeiramente acidentada, com serras e terrenos ondulados e altitudes que variam de 1.600 a 600 m. O divisor leste é formado pelas montanhas da Serra do Espinhaço, estreitas e alongadas na direção N-S, e com altitudes de 1.300 a 1.000 m. Do lado oeste, destacam-se as Serras Gerais de Goiás, cujas cotas oscilam entre 1.200 e 800 m.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL divide a bacia do rio São Francisco em nove sub-bacias. A região estudada corresponde à sub-bacia 40. Esta sub-bacia representa a área de drenagem do reservatório de Três Marias e parte da área de drenagem do Alto São Francisco (sub-bacias 40 e 41) (ONS, 2009a).

Segundo a ANA/SPR, o Alto São Francisco possui 167 municípios, sendo 93% da área urbanizada, com uma densidade demográfica de 62,9 hab/km<sup>2</sup> e uma disponibilidade hídrica de 6.003 m<sup>3</sup>/hab/ano .

O rio São Francisco é um dos mais importantes rios brasileiros e tem papel destacado principalmente na região sudeste e Nordeste. O "Velho Chico", como é chamado pelos moradores é essencial nesta parte do país, não só devido a sua importância estratégica, sendo ele o principal rio de um projeto de transferência de água entre bacias hidrográficas, que visa resolver a seca que afeta os estados do Nordeste: Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco; mas também por causa de seu significado cultural, a área em torno dele está repleta de sítios arquitetônicos, arqueológicos e patrimoniais Santos (2003).



(a) Bacia Hidrográfica da UHE Três Marias



(b) Barragem da UHE Três Marias

Fonte: Adaptado de Schwanenberg et al. (2015) e Fan (2011).

Figura 27 – Local de Estudo UHE Três Marias, localizado no estado de Minas Gerais (MG).

O reservatório de Três Marias, também conhecido como UHE Bernardo Mascarenhas, é um dos 5 reservatórios construídos neste rio para fins de geração energética. O reservatório está localizado no Rio Região do Alto São Francisco, no centro do estado de Minas Gerais entre os municípios de São Gonçalo do Abaeté, Felixlândia, Morada Nova de Minas, Biquinhas, Paineiras, Pompéu, Abaeté e Três Marias Figura 27.

## 10.1 UHE-Três Marias

As obras de construção da represa tiveram início em maio de 1957, sendo concluída em janeiro de 1961, sob a responsabilidade da CVSF (Comissão do Vale do São Francisco). Sua construção teve como principais objetivos: regularização do curso das águas do rio São Francisco nas cheias periódicas, melhoria da navegabilidade, utilização do potencial hidrelétrico, e fomento da indústria e irrigação. No momento da sua inauguração, a UHE Três Marias era considerada a maior usina hidrelétrica brasileira.

As dimensões da represa são 2.700 m de largura e 75 m de altura. O reservatório tem uma área máxima de 1.010 km<sup>2</sup> e mínima de 316 km<sup>2</sup>, correspondendo a volumes de 19.528 e



4.250 hm<sup>3</sup>, respectivamente. O nível máximo operativo é 572,50 m, e o nível mínimo operativo é 549,20 m e área de drenagem é de 50.732 km<sup>2</sup> (Tabela 8).

Tabela 8 – Características da Usina Hidrelétrica de Três Marias.

Cota do Coroa-mento	N.A. Máx-imum (m)	N.A. Máx Normal (m)	N.A. Mín Normal (m)	N.A. Mín Ope-rativo (m)	Potência Instalada (MW)	Garantia Física (MW Médio)	Vazão do Ver-tedouro (m <sup>3</sup> /s)
576,23	573,40	572,50	549,20	549,20	396,00	239,00	8.700

Fonte: Adaptado de Cavallari, Silva e Castro (2012)

Com seis geradores 66 MW alimentado por turbinas Kaplan, a capacidade total instalada é de 396 MW (Tabela 9).

Tabela 9 – Características das Turbinas da UHE Três Marias.

Número de Turbinas	Tipo de Turbina	Potência (MW)	Vazão Máxima (m <sup>3</sup> /s)
6	Kaplan	6 x 67,19	900

Fonte: Adaptado de Cavallari, Silva e Castro (2012)

A barragem está atualmente administrada pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e a energia é entregue ao SIN (Sistema Interligado Nacional), a rede elétrica interligada brasileira, e sua operação é coordenada pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

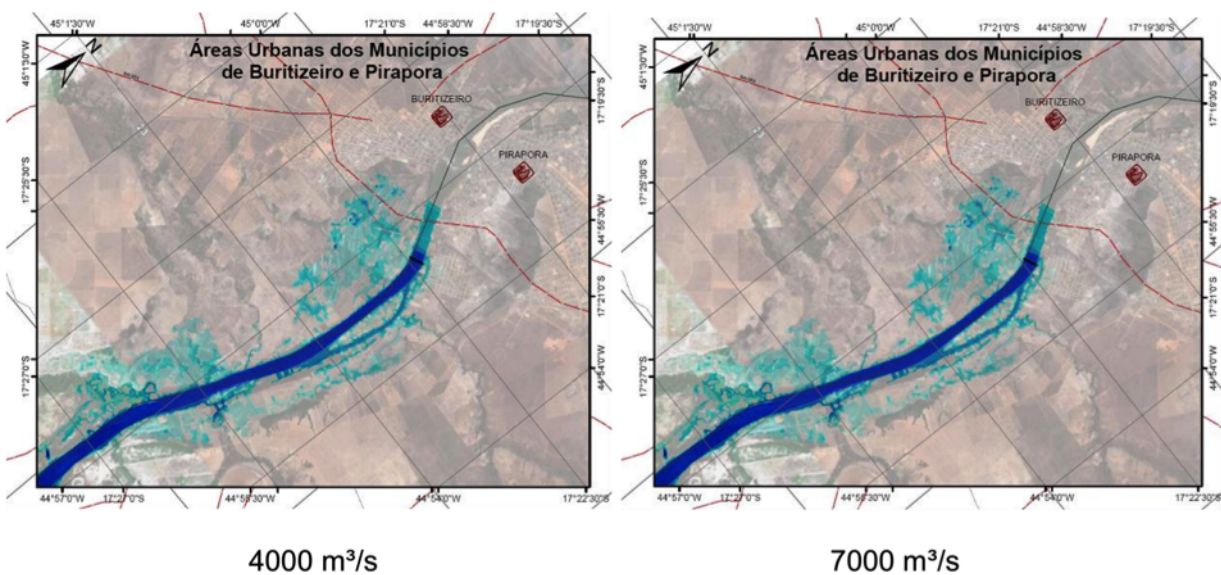
A defluência máxima da represa é de 9.600 m<sup>3</sup>/s. A vazão histórica diária total da represa de Três Marias entre 1931 e 2011 variou entre 42 e 7.245 m<sup>3</sup>/s com uma vazão média de longo termo (MLT) e de 689 m<sup>3</sup>/s. A previsão de descarga do reservatório é relevante para o processo operacional dos reservatórios a jusante subsequentes no rio São Francisco, uma vez que é responsável por cerca de 26 % da vazão total do rio, e, portanto, afeta significativamente a estratégia energética da região Nordeste do país. (ONS, 2009b).

### Restrições de Operação da UHE Três Marias

O reservatório tem restrições operacionais de descarga à jusante por causa de inundações causadas por vazões acima de 2.000 m<sup>3</sup>/s, descargas desta ordem inundam ilhas habitadas por comunidades de subsistência localizadas à jusante da barragem. Outra restrição existente é em relação a vazões de descarga acima de 4.000 m<sup>3</sup>/s, que causarão graves inundações na cidade de Pirapora, que está localizada cerca de 130 km da barragem Figura 28.

Caso as descargas da barragem e das bacias incrementais chegar à ordem de 8.000 m<sup>3</sup>/s, os impactos de uma inundação causada por vazões desta magnitude podem ser notadas até em

regiões no estado da Bahia; no médio e baixo São Francisco, que estão cerca de 700 km distantes da barragem. A gestão operacional da barragem é ainda limitada por restrições ambientais. A descarga só pode ser reduzida para valores inferiores a  $460 \text{ m}^3/\text{s}$  após o monitoramento da ictiofauna, a fim de evitar o aprisionamento de peixes. A mesma regra é aplicada ao fechamento do vertedouro. Uma descarga mínima igual ou superior a  $420 \text{ m}^3/\text{s}$  deve ser sempre assegurada para fins de vazões ambientais. A variação da vazão deve sempre ser feita lentamente, abaixando ou aumentando não mais do que  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  a cada 30 minutos (CAVALLARI; SILVA; CASTRO, 2012).



Fonte: Cavallari, Silva e Castro (2012)

Figura 28 – Efeitos de Inundação na cidade de Pirapora para vazões de 4.000 e 7.000  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Conforme visto no seção 3.3, no Brasil a operação de hidrelétricas e o controle de enchentes é coordenado pelo ONS, que classifica as usinas de acordo com seu porte, conforme sua relevância hidráulica e energética, e seu papel na estabilidade da rede. A UHE de Três Marias está atualmente classificada como Tipo I, pois está conectada ao SIN e porque a operação dela causar impactos na operação hidráulica e de segurança da rede centralizadas do ONS. Para esta classificação de Barragens (Tipo I), o ONS é responsável pela programação dos despachos (valores-alvo) mensal, semanal, diários e em regime de tempo real(ONS, 2011a).

### 10.1.1 Caracterização da Situação de Operação de Três Marias

A previsão de vazões afluentes ao reservatório de Três Marias garante uma antecedência de até 3 dias no conhecimento do hidrograma afluente. O acompanhamento da evolução das vazões incrementais é de suma importância na tomada de decisões na operação de controle de cheias deste reservatório, pois a restrição de defluência em Três Marias é variável para que, ao

se combinar com a vazão incremental no trecho Três Marias / Pirapora, não seja ultrapassada a vazão de 4.000 m<sup>3</sup>/s em Pirapora.

Tabela 10 – Resumo de Situação de Operação para o Reservatório de Três Marias.

Responsável	Situação	Afluência (m <sup>3</sup> /s)	Defluência (m <sup>3</sup> /s)	Volume (V)
ONS	Normal	QAFL < 2500	QDEFL ≤ 2000	V ≤ VE
ONS	Atenção	QAFL < 2500	QDEFL ≤ 2000 e INC <sub>TM<sub>PR</sub></sub> < 1500	V > VE (1)
ONS	Atenção	QAFL ≥ 2500	QDEFL ≤ 2000 e INC <sub>TM<sub>PR</sub></sub> < 1500	VE < VE < VE <sub>ATAL</sub>
Agente	Alerta	QAFL ≥ 2500	3500 < QDEFL + INC <sub>TM<sub>PR</sub></sub> < 4500 ou V ≥ VE <sub>ATAL</sub>	V > VE
Agente	Emergência	QAFL ≥ 2500	4000 < QDEFL + INC <sub>TM<sub>PR</sub></sub>	V > VE

Fonte: (ONS, 2015)

As diretrizes para regras de operação de controle de cheias do sistema independente de reservatórios da bacia do rio São Francisco, bem como do reservatório de Três Marias estão apresentadas em ONS (2015). No referido trabalho também apresenta-se a Tabela 10, na qual estão apresentados os critérios de classificação da operação da UHE no período de controle de cheias, ou seja, caracteriza as situações Normal, Atenção, Alerta e Emergência com indicação do responsável pela operação.

A seguir são apresentadas as variáveis para o estabelecimento dos critérios de operação do reservatório de Três Marias, nas situações Normal, Atenção, Alerta e Emergência:

- QAFL = Vazão afluente a Três Marias para 1 dia à frente;
- QDEFL = Vazão defluente média de Três Marias, programada para 1 dia à frente;
- INC<sub>TM<sub>PR</sub></sub> = Vazão incremental média diária no trecho Três Marias / Pirapora 1 dia à frente. No final de semana deverão ser feitas previsões para 3 dias à frente;
- VE = % de volume de espera definido no PAPC;
- VE<sub>ATAL</sub> = % de volume de espera Atenção-Alerta, conforme RT-OR.BR.01 - Conceitos e Metodologias para a Operação Hidráulica dos Sistemas de Reservatórios;
- V = % de volume útil previsto para Três Marias 1 dia à frente.

Observação: Caso a confiabilidade das previsões de vazões seja aumentada, poderão ser fornecidas previsões de vazões para um horizonte maior.

A condicionante para definição da situação de Normal para Atenção pode ser uma vazão defluente média de Três Marias programada para 1 dia à frente inferior ou igual a 2.000 m<sup>3</sup>/s,

com vazões incrementais médias diárias previstas para um dia à frente inferior a 1.500 m<sup>3</sup>/s no trecho Três Marias - Pirapora.

Para Três Marias, tem-se  $VE_{ATAL}$  condicionando a definição da situação de Atenção para Alerta, podendo a situação de Alerta ficar caracterizada com vazões em Pirapora superiores a 3500 m<sup>3</sup>/s e inferiores a 4.000 m<sup>3</sup>/s.

Os quadros abaixo apresentam os critérios de classificação da operação da UHE de Três Marias, no período de controle de cheias, ou seja, caracterizam as situações Normal, Atenção, Alerta e Emergência com indicação do responsável pela operação

QAFL(1Dia)	2500m <sup>3</sup> /s		$V_{MAXN}$ 100% VU
Atenção <sup>(1)</sup> ou Alerta	Alerta	Alerta	Emergência
Atenção	Atenção	Alerta	Emergência
Atenção	Atenção		
QDEFL(1Dia)	2000m <sup>3</sup> /s	3500m <sup>3</sup> /s	4000m <sup>3</sup> /s
QDEFL+INC <sub>TMPR</sub> (3 Dias)			
ONS	Alerta	ONS *	

\* Se a situação for de Atenção,, e AGENTE se a situação for de alerta

Fonte: ONS (2015)

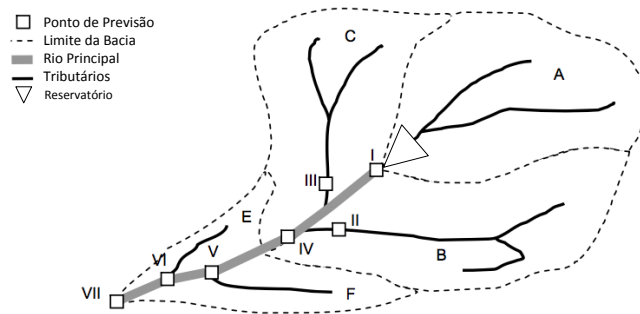
Figura 29 – Situações de Operação de Três Marias.

## 10.2 Modelo Conceitual do Problema

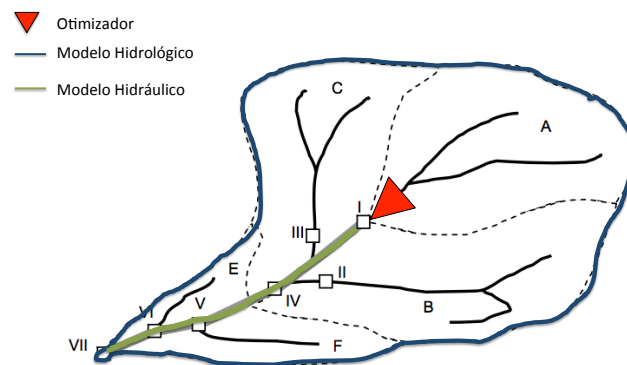
Para o estudo de caso da UHE de Três Marias nós temos que o problema conceitual é controlar das vazões defluentes da UHE, que podem causar impactos de inundação a jusante em Pirapora. Desta forma para o estudo de caso podemos dividir o problema em três categorias:

- Balanco hídrico na escala da bacia hidrográfica;

- b) Controle de volume de armazenamento, volume de espera e de vazão vertida pelo reservatório; e
- c) Comportamento hidráulico a jusante da represa;



(a) Esquemática Conceitual da Bacia



(b) Esquemática da Modelagem do Problema

Fonte: Adaptado de (WERNER; DIJK, 2005).

Figura 30 – Esquemática geral da modelagem da bacia hidrográfica do estudo de caso

Assim desta forma existem contribuições de escoamento superficial no rio principal, nos tributários e no Reservatório da Represa; além disto o reservatório da represa deve satisfazer diferentes usos, que para nosso estudo de caso, os usos serão simplificados para de geração elétrica e controle de cheias e finalmente existem o comportamento da propagação de ondas a jusante da barragem.

A Figura 30, mostra o modelo conceitual da bacia a ser estudada, de maneira similar à Figura 8 dividiu-se os processos a fim de se empregar as ferramentas corretas para abordar o

problema conceitual:

- I. Modelo Hidrológico para os processos de escoamento superficial e balanço hídrico da Barragem;
- II. Modelo Hidráulico para a seção do corpo d'água entre a barragem e o ponto de controle de inundação;
- III. Otimizador para as os níveis e vazões afluentes ótimos do reservatório;

Naturalmente pode-se executar todas as etapas de modelação acima descritas separadamente e de maneira sequencial, ou seja, primeiro se modela a bacia hidrográfica para calcular as vazões de contribuição lateral, para em seguida importar os dados obtidos pelo modelo hidrológico ao modelo do reservatório e em seguida utilizar as saídas de ambos os modelos no modelo hidráulico para averiguar se haverá impactos no ponto de controle a jusante da barragem. Porém este processo pode ser lento e custoso, então optou-se por integrar as três etapas de modelagem para facilitar a comunicação e troca de resultados entre elas.

### 10.2.1 Integração de Modelos e Banco de Dados

A arquitetura de modelagem então para o estudo de caso seguirá a seguinte organização, serão integrados bancos de dados (ANA e CEMIG) contendo os dados de precipitações, vazões e níveis com diferentes tipos de modelos que serão empregados para modelar diferentes processos que ocorrem na bacia.

Os processos hidrológicos serão modelados utilizando o MGB-IPH, o modelo hidrológico servirá como espinha dorsal do programa, gerando dados de vazões incrementais que serão utilizadas pelos outros modelos a serem integrados. O MGB também consegue simular propagação de onda em canais abertos através de Muskingum-Cunge e portanto também pode ser utilizado para simular o comportamento e efeitos de inundação no ponto de controle em Pirapora.

Para estudar a propagação da onda de inundação no trecho do canal a jusante da barragem e o ponto de controle no exutório da modelagem. Serão utilizados uma séries de modelos dentre eles o SOBEK, MGB-IPH, RTC-Tools e SPRNT, o intuito de utilizar diversos modelos está em avaliar o modelo hidráulico mais robusto para a aplicação, o SPRNT por questões técnicas não é integrável aos outros e será avaliado separadamente.

E finalmente os volumes e descargas ótimas para o reservatório serão abordados utilizando um otimizador, no caso o IPOPT com o modelo hidráulico selecionado como sendo o

mais robusto. O otimizador irá definir as potenciais vazões de descargas ótimas que mantém os níveis operacionais do reservatório, estas descargas entram como dados de entrada dos modelos hidráulicos que em seguida simularam os níveis no ponto de controle de inundação (Pirapora) e após esta conferência pode-se definir a vazão de descarga ótima e nível operacional ótimo.

A Figura 31, mostra a arquitetura proposta para simulação para o estudo de caso. A simulação para o tempo de previsão  $T_0$  segue a sequência Aquisição e Processamento de dados utilizando o MGB-IPH, em seguida os resultados gerados do MGB-IPH servirão também como entrada de dados para os modelos Hidráulicos (SOBEK e RTC-Tools). Já para o modo de previsão a sequência é um pouco diferente, novamente inicia-se com o MGB-IPH adquirindo e processando os dados da previsão numérica climática ou do Horizonte de previsão, cujos resultados serão incorporados ao Otimizador (MPC) e indiretamente aos modelos hidráulicos, porém para o caso de estudo só será utilizado o modelo mais apto na simulação de previsão e otimização.

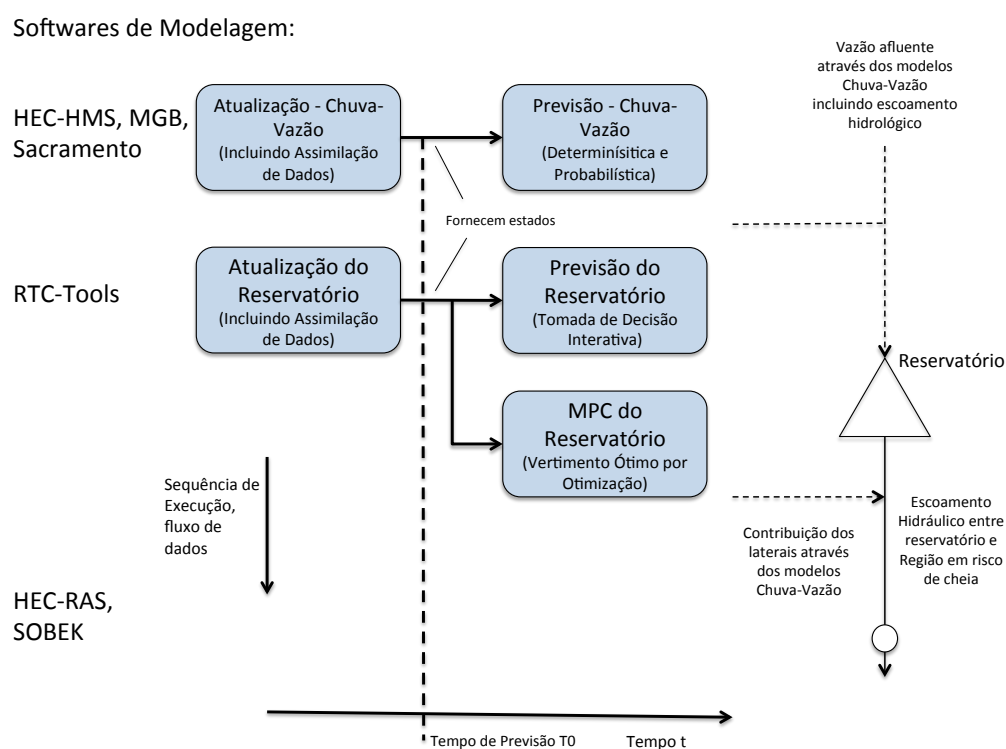


Figura 31 – Arquitetura do modelo para o SSD e Previsão Estocástica

Fonte: Baseado em Schwanenberg et al. (2013).

## 10.3 Configuração e Calibração dos Modelos

A geometria dos transectos dos canais foi obtida de dados fornecidos por um levantamento feito pela própria CEMIG, estes dados estão apresentados com mais detalhes no Apên-

dice A. Neste Apêndice estão listados as geometrias das seções transversais dos cursos de rios utilizadas na modelação hidráulica deste trabalho. Foram modelados trechos dos rios Abaetés e São Francisco entre o UHE de Três Marias e a cidade de Pirapora.

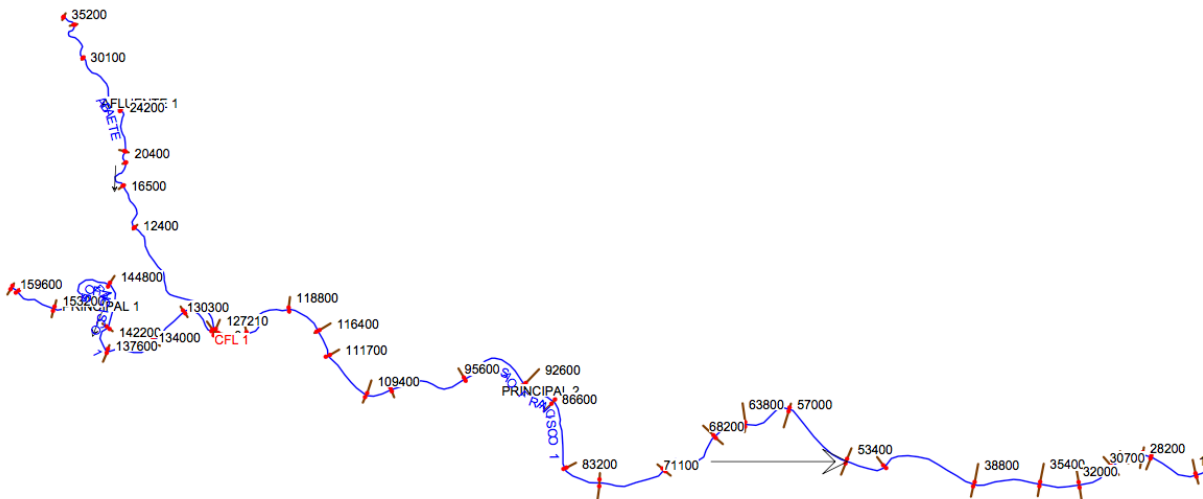


Figura 32 – Localização das seções transversais para o Rio Abaetés e Rio São Francisco.

A Figura 32, mostra a disposição espacial destas seções. Foram levantados dados de dois rios: São Francisco e Abaetés. O ponto inicial do rio São Francisco está localizada a UHE Três Marias e no ponto inicial do rio Abaetés está localizada a estação de medição da ANA PBR040. O ponto de confluência entre o a Abaetés e o São Francisco está na Seção 127200 e o ponto de controle de cheia para o problema proposto está na cidade de Pirapora a jusante da barragem, o ponto escolhido é a seção SF29000, onde está localizada a estação de monitoramento PiraporaPonte.

Tabela 11 – Delimitação problema: trechos dos rios Abaetés e São Francisco modelados.

Nome Rio	Ponto de monitoramento de Entrada	Ponto de monitoramento de Saída
rio Abaetés	Vazão no Ponto PBR040	-
rio São Francisco	Defluência da UHE Três Marias	Vazão em PiraporaPonte

Tabela 12 – Comprimentos das margens e canal principal do rio Abaetés

Nome do Transecto	Margem Esquerda	Canal Principal	Margem Direita
RA35200	1189.6	1189.6	1189.6
RA34000	3843.35	3858.52	3911.11
RA30100	5912.85	5936.18	6017.09
RA24200	3916.27	3741.22	3623.78
RA20400	960.4	1082.55	1254.65
RA19300	2849.04	2847.79	2842.77
RA16500	4133.96	4105.91	4163.63
RA12400	12330.43	12359.79	15151.78



A Tabela 11, mostra os rios que foram modelados bem como a delimitação do problema com seus pontos de entrada e saída dos quais foram utilizados dados de monitoramento para alimentar e calibrar o modelo.

Tabela 13 – Comprimentos das margens e canal principal do rio São Francisco

Nome do Transecto	Margem Esquerda	Canal Principal	Margem Direita
SF159600	716.89	625.6	535.28
SF156000	3634.71	3658.85	3918.75
SF153200	2623.52	2755.75	3210.99
SF148800	4683.94	4416.08	4329.27
SF144800	4267.7	4031.3	3801.13
SF142200	2384.24	2559.72	2793.18
SF137600	4572.49	4640.05	4803.1
SF134000	3532.26	3572.79	3594.37
SF130300	3875.08	3655.49	3370.07
SF127210	-	-	-
SF127190	2861.47	3141.93	3290.83
SF122100	5224.65	5091.66	5372.9
SF118800	3500.42	3299.58	3232.88
SF116400	2462.24	2362.04	2421.55
SF111700	4647.58	4783.23	4948.76
SF109400	2311.48	2293.68	2344.54
SF102500	6934.43	6881.03	7033.62
SF95600	7266.19	6854.29	6775.32
SF92600	3162.65	3014.86	2880.03
SF86600	5845.11	6008.01	6157.84
SF83200	3409.68	3397.73	3400.99
SF77200	5845.11	6008.01	6157.84
SF71100	6020.11	6079.64	6200.95
SF68200	3037.19	2959.5	2850.5
SF63800	4825.64	4372.98	4434.43
SF57000	7171.09	6829.41	6673.47
SF53400	3381.97	3555.92	3640.73
SF44700	8866.28	8731.16	8722
SF38800	5761.03	5830.71	5964.14
SF35400	3395.66	3445.99	3479.29
SF32000	3261.99	3379.18	3517.51
SF30700	1480.68	1344.91	1259.78
SF29000	1675.84	1662.02	1760.78

As geometrias dos canais dos rios São Abaetés e do Rio São Francisco com os comprimentos das seções e respectivas geometrias transversais estão detalhadas no Apêndice A.

As tabelas 39 até 48 contém as características geométricas dos transectos do rio Abaetés conforme a Figura 32. Nas tabelas citadas  $h$  corresponde à cota em metros e  $z$  corresponde a largura da seção na cota correspondente em metros.

A Tabela 12, mostra as distâncias entre os canais principais e margens esquerda e direita entre os transectos do rio Abaetés.

As tabelas 60 até 87 contém as características geométricas dos transectos do rio São Francisco conforme a Figura 32. Nas tabelas citadas  $h$  corresponde à cota em metros e  $z$  corresponde a largura da seção na cota correspondente em metros. A Tabela 13, contém as distâncias entre os canais principais e margens esquerda e direita entre os transectos do rio São Francisco.

### 10.3.1 Configuração do MGB

Na configuração o modelo atua como espinha dorsal dos modelos computando a vazão de entrada no reservatório de Três Marias e as vazões laterais a serem implementadas nos modelos hidráulicos.

Tabela 14 – Parâmetros Fixos do MGB-IPH

Parâmetro Fixo	Descrição
Índice de Área Foliar (IAF)	O IAF expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. É um parâmetro adimensional ( $m^2.m^2$ ) e que, em geral, pode ser medido ou estimado a partir de informações na bibliografia.
Albedo	O albedo é a parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal.
Resistência Superficial (RS)	A resistência superficial representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Esta resistência é diferente para os diversos tipos de plantas e depende de variáveis ambientais como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta.
Altura do Dossel (Z)	A altura média da vegetação é utilizada no modelo hidrológico para estimar a resistência aerodinâmica, que atua no controle da evapotranspiração. Quanto maior a resistência aerodinâmica, menor é o fluxo de evapotranspiração. A resistência aerodinâmica é considerada menor em florestas, onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento.

Fonte: Fan (2011)

Os dados de entrada do MGB podem ser divididos basicamente de 2 tipos: Dados rasterizados sobre a geografia da bacia que incluem informações sobre o relevo sendo estes dados o Modelo Digital de Elevação e dados sobre o uso e ocupação do solo e características dos solos da bacia a ser simulada; O segundo grupo de dados consiste de dados fluviométricos, pluviométricos e climatológicos da bacia a ser simulada (COLLISCHONN et al., 2010). Enquanto o primeiro grupo servirá para definir as condições hidráulicas da bacia como divisão de sub-bacias, Unidades de resposta Hidrológica e sentido de fluxos; segundo grupo servirá para determinar o balanço hídrico desta bacia.

Existe outro grupo de dados de entrada que são parâmetros fixos Tabela 14 e calibráveis

Tabela 15: Os parâmetros fixos são valores que podem ser medidos, ou que podem ser relacionados à vegetação, e não são alterados no processo de calibração do modelo; e os parâmetros calibrados são definidos como dados que são alterados durante a calibração do modelo, buscando um bom ajuste entre os dados de vazão observados e calculados e estão associados ao tipo de Unidade de Resposta Hidrológica e a sub-bacia.

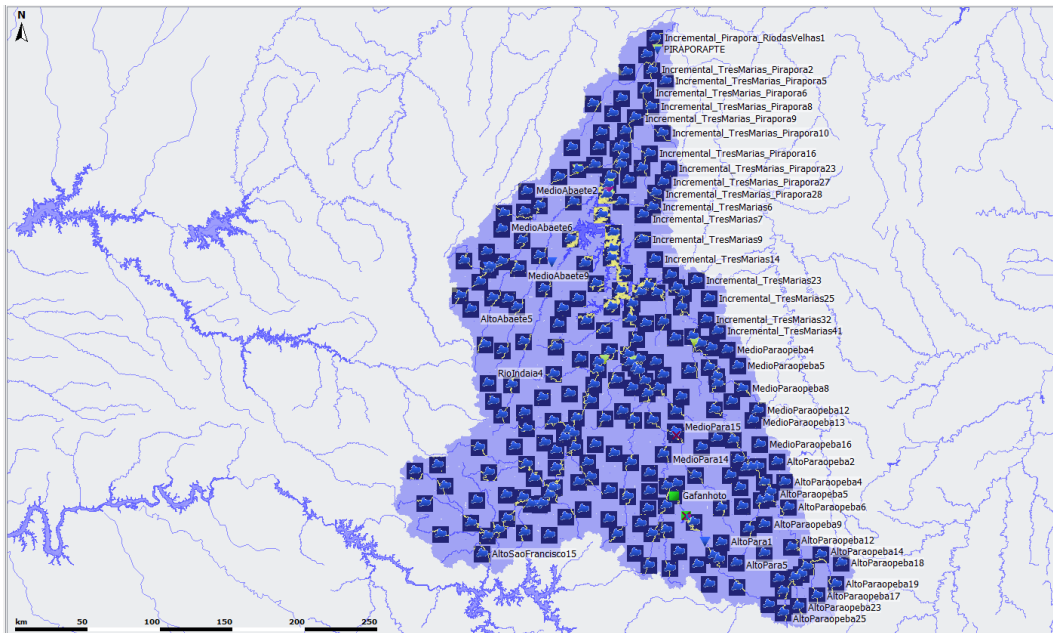
Tabela 15 – Parâmetros Calibráveis do MGB-IPH

Parâmetro Calibrável	Descrição
Capacidade de Armazenamento do Solo (Wm)	Capacidade de armazenamento de água no solo
Forma da relação entre armazenamento e saturação (b)	Parâmetro empírico relacionado que define a variabilidade da capacidade de armazenamento do solo em torno de Wm. Atua principalmente na forma dos picos dos hidrogramas calculados
Vazão durante a estiagem (Kbas)	Parâmetro que controla a vazão durante a estiagem. Valores mais altos implicam em maior escoamento subterrâneo.
Quantidade de água que escoia subsuperficialmente (Kint)	Parâmetro que controla a quantidade de água da camada de solo que escoia subsuperficialmente.
Forma da curva de redução da drenagem intermediária (XL)	Parâmetro que controla a forma da curva de redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo.
Fluxo do reservatório subterrâneo para a camada superficial (CAP)	Parâmetro que controla a possibilidade de retorno de água subterrânea para a camada de solo.
Armazenamento Residual (Wc)	Parâmetro que limita o armazenamento residual e subterrâneo.
Calibração da propagação superficial (CI)	Parâmetro para calibração da propagação superficial nas mini-bacias.
Calibração da propagação sub-superficial (CS)	Parâmetro para calibração da propagação subterrânea nas mini-bacias.
Retardo do reservatório subterrâneo (CB)	Parâmetro que representa o retardo do reservatório subterrâneo.
Vazão de Base (QB)	Parâmetro que representa o fluxo de base da bacia hidrográfica

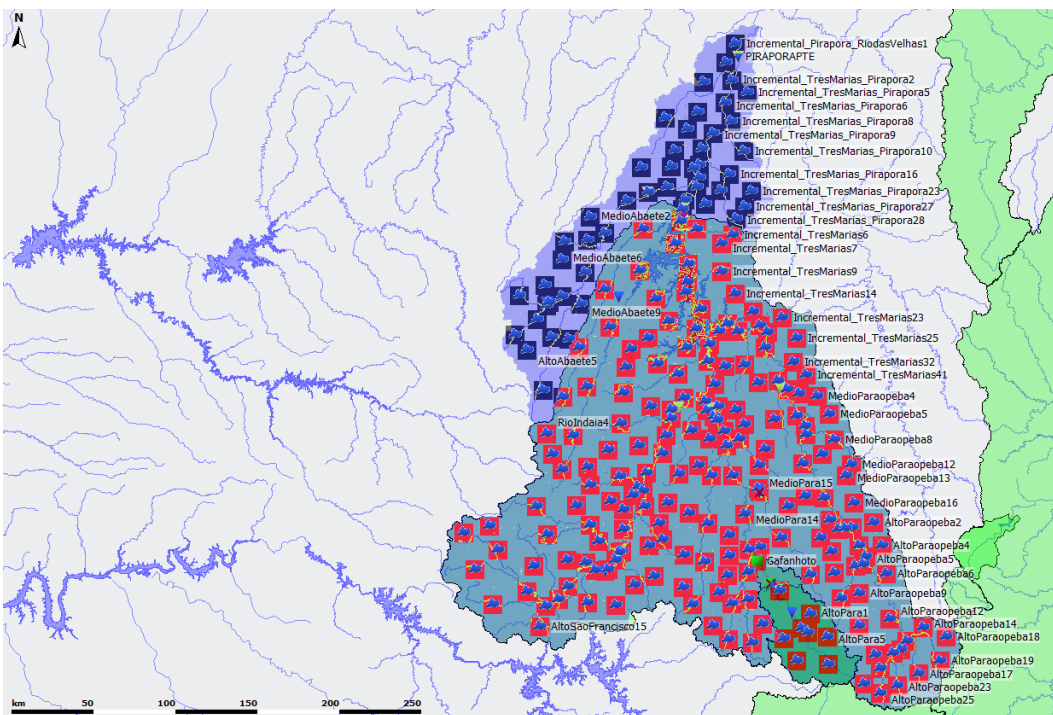
Fonte: Fan (2011)

### Calibração do MGB-IPH

O MGB foi configurado exatamente conforme Fan (2011), sendo que o mapa de solos da bacia foi obtido através de dados da Universidade Federal de Viçosa (UFV), com dados do portal IDE-GeoMINAS e o mapa base para construção do Modelo Digital de Elevação do Terreno foi utilizado um mapa 1:1.000.000 obtido de Amaral (1993). O mapa de vegetação e classes de uso e ocupação do terreno foram obtidos de um mapa de resolução espacial de aproximadamente 1km desenvolvido por Eva et al. (2002).



(a) Sub-Bacias configuradas no MGB



(b) Bacias do MGB-IPH

Figura 33 – Visualização do MGB configurado no Deltf-FEWS.

Quanto aos parâmetros do modelo MGB, os dados acima resultaram no delineamento de 246 mini-bacias e 8 classes de Unidades de Resposta Hidrológica. Assim como em Fan (2011) a calibração foi feita automaticamente através de uma interface via *MapWindow*. Inicialmente foi definido que os parâmetros  $W_m$ ,  $b$ ,  $K_{bas}$ ,  $K_{int}$ ,  $CI$ ,  $CS$  e  $CB$  de todas as Unidades de Resposta Hidrológicas (exceto água) deveriam ser calibrados considerando todos os postos fluviométricos selecionados. Em uma segunda calibração, apenas algumas sub-bacias foram calibradas, visando

refinar os resultados obtidos para a região oeste da bacia. No Apêndice B, estão detalhados os valores dos parâmetros de calibração para o modelo MGB-IPH.

A figura 33, mostra a configuração descrita acima implementada dentro do DELT-FEWS. Nela é possível observar as sub-bacias simuladas com os dados de entrada de precipitação e vazão. Na 33a estão representadas espacialmente as 246 mini-bacias configuradas enquanto que na 33b, mostram em vermelho as sub-bacias a montante da barragem, que calculam a contribuição na represa de Três Marias e em azul as sub-bacias a jusante da barragem que calculam a contribuição para o ponto em Pirapora.

### 10.3.2 SOBEK

A versão utilizada do SOBEK neste trabalho foi a 2.12. O modelo foi configurado utilizando a geometria (seções transversais e distância entre elas) disponíveis em Apêndice A. Então de maneira análoga aos dados disponíveis, dividiu-se o corpo d'água em três: rio Abaetés, rio São Francisco 1 e rio São Francisco 2.

Tabela 16 – Configuração dos cursos d'água no SOBEK

Nome do Curso do Rio	Comprimento Total (m)	Condição de Entrada	Condição de Saída
rio Abaetés	35121.561	Vazão no Ponto PBR040	Seção 127200
rio São Francisco 1	29915.628	Defluência da UHE Três Marias	Seção 127200
rio São Francisco 2	100259.662	Seção 127200	Vazão em PiraporaPonte

A configuração das condições de contorno e ligação entre os cursos d'água então é feita da seguinte forma: o rio Abetés possui como condição forçante as vazões de entrada no ponto PBR040, o rio São Francisco 1 tem como condição forçante as vazões defluentes da UHE Três Marias e a soma das vazões defluentes dos cursos d'água rio Abaetés e rio São Francisco 1 são somadas a um ponto de conexão (Seção 127200) que servirá de condição forçante de entrada de vazão para o rio São Francisco 2 e a condição de controle final no ponto PiraporaPonte são as vazões observadas (Tabela 16).

Na figura 34 é possível visualizar a configuração descrita acima com a localização dos transectos e das condições de contorno para o modelo hidráulico construído para esta configuração.

Para completar a configuração, além da entrada de vazão nos pontos de condição de controle definidos acima, utilizou-se também aquisição de dados para melhorar os resultados do modelo; integrou-se nele as vazões incrementais fornecidas pelo MGB-IPH. Estas vazões foram adicionadas conforme sua correspondência local, na Figura 35, mostra a localização das contribuições das vazões incrementais para esta configuração.

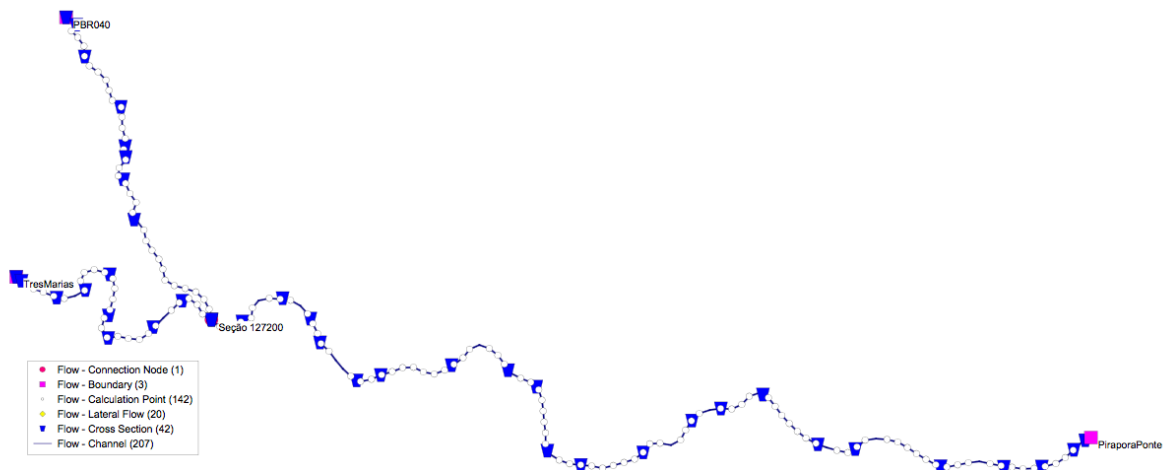


Figura 34 – Esquema da configuração da geometria para o SOBEK, com os transectos

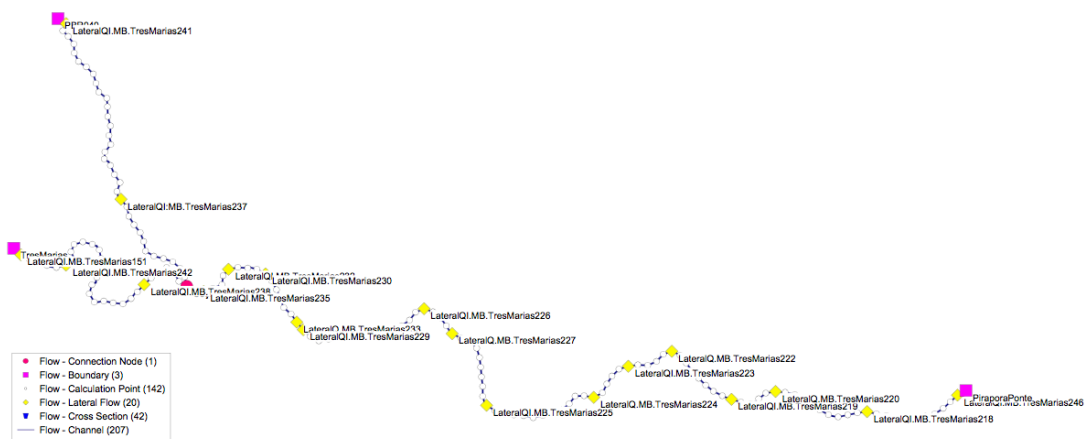


Figura 35 – Esquema da configuração da geometria para o SOBEK, com as contribuições laterais

### Calibração do SOBEK

A calibração do modelo para esta configuração foi relativamente simples; sendo inicialmente feita uma calibração manual local dos cursos separadamente, e em seguida é feita uma refinada através de uma calibração global automatizada dos três cursos juntamente:

- I. Calibração manual para os três cursos separadamente (rio Abetés, rio São Francisco 1 e rio São Francisco 2) utilizando:
  - a) Fluxo permanente com diferentes vazões críticas (máxima e mínima);
  - b) Fluxo não-permanente com séries de vazões históricas reais;
- II. Calibração automatizada global para o trecho modelado inteiro

Na primeira etapa, ajustou-se os valores de *Manning* nos quais os cursos rio abetés 1, rio São Francisco 2 e rio São Francisco 1 produziam o melhores resultados, o intuito era definir a faixa de valores nos quais o coeficiente de *manning* variava em cada transecto e testar se o valor médio era capaz de reproduzir bons resultados.

Na segunda calibração automatizada global tem como objetivo encontrar o conjunto ótimo de valores de *manning* para cada transecto. A calibração otimizada foi feita usando um script em *python*, que segue o seguinte *workflow*:

- I. Importar as bibliotecas necessárias;
- II. Importar o modelo e os dados medidos;
- III. Comparar os resultados atuais com os medidos;
- IV. Tomar a faixa de valores a ser usada na calibração do *manning*;
- V. Rodar os modelos em sequência com os diferentes combinações de valores para o modelo;
- VI. Calcular os valores de adequação de ajuste para cada caso e assim chegar no melhor configuração de calibração do modelo;

A figura 36, mostra o resultado d a calibração com a distribuição espacial dos valores de fricção (Coeficiente de *Manning*) ao longo do curso dos corpos d'água modelados. No Apêndice C estão listados os valores da geometria de canais para a configuração e os valores escolhidos para *manning*.

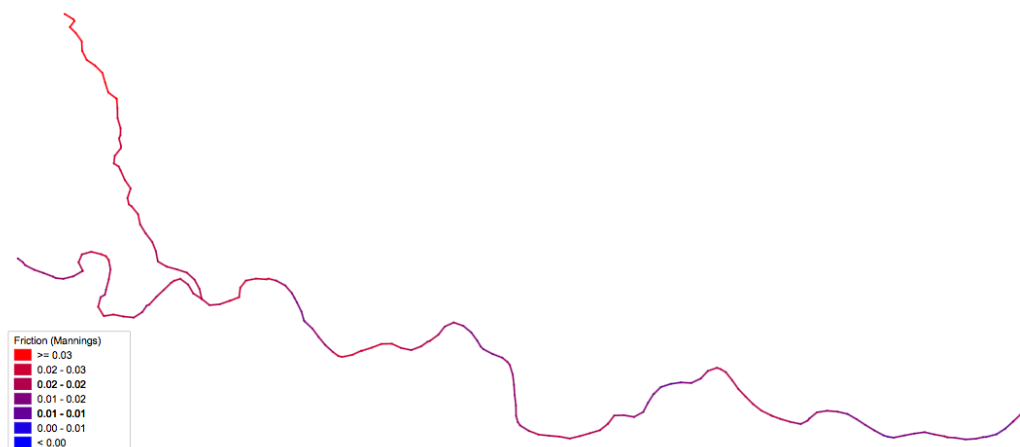


Figura 36 – Distribuição dos valores do coeficiente de *Manning* para a configuração SOBEK

### 10.3.3 SPRNT

O SPRNT foi configurado de maneira análoga ao SOBEK, utilizou-se também a mesma geometria disponibilizada pela CEMIG. E assim como o no caso do SOBEK dividiu-se os corpos d'água em três cursos: rio Abetés, São Francisco 1 e São Francisco 2.

Também de maneira muito similar ao SOBEK, a configuração das condições de contorno e ligação entre os cursos d'água foi feita da seguinte forma: o rio Abetés possui como condição forçante as vazões de entrada no ponto PBR040, o rio São Francisco 1 tem como condição forçante as vazões defluentes da UHE Três Marias e a soma das vazões defluentes dos cursos d'água rio Abetés e rio São Francisco 1 são somadas a um ponto de conexão (Seção 127200) que servirá de condição forçante de entrada de vazão para o rio São Francisco 2 e a condição de controle final no ponto PiraporaPonte é o nível do rio neste ponto em metros.

Tabela 17 – Configuração dos cursos d'água no SPRNT

Nome do Curso do Rio	Comprimento Total (m)	Condição de Entrada	Condição de Saída
rio Abaetés	35121.56	Vazão no Ponto PBR040	Junção dos Rios Abaetés com São Francisco
rio São Francisco 1	29915.63	Defluência da UHE Três Marias	Junção dos Rios Abaetés com São Francisco
rio São Francisco 2	101327.47	Junção dos Rios Abaetés com São Francisco	H PiraporaPonte (m)

A Tabela 17 lista maiores detalhes da configuração listando os comprimentos totais dos rios, dados de entrada e condições de contorno em Pirapora Ponte.

Como o modelo é novo e está ainda em desenvolvimento, existiu uma dificuldade em achar configurações estáveis. Durante a fase de teste do modelo, duas configurações se mostraram mais estáveis:

- Usando todas as seções transversais disponíveis, denominada versão completa;
- Usando uma seção transversal em média a cada 10 km. denominada versão reduzida;

#### Calibração do SPRNT

Para calibrar o modelo, foram utilizados os mesmos valores do coeficiente de *manning* usados na configuração do SOBEK, como o modelo utiliza condição de contorno diferente do SOBEK (nível em metros), foi necessário converter a vazão do ponto de monitoramento PiraporaPonte usando uma curva-chave calculada utilizando dados históricos de vazão e nível da régua de 2010 até 2012 (Figura 37).

É importante observar que os dados estão em valores relativos, então foi necessário aplicar uma correção de valores adicionando o *datum* do fundo do rio para obter os valores corretos de nível absolutos que são utilizados no modelo.



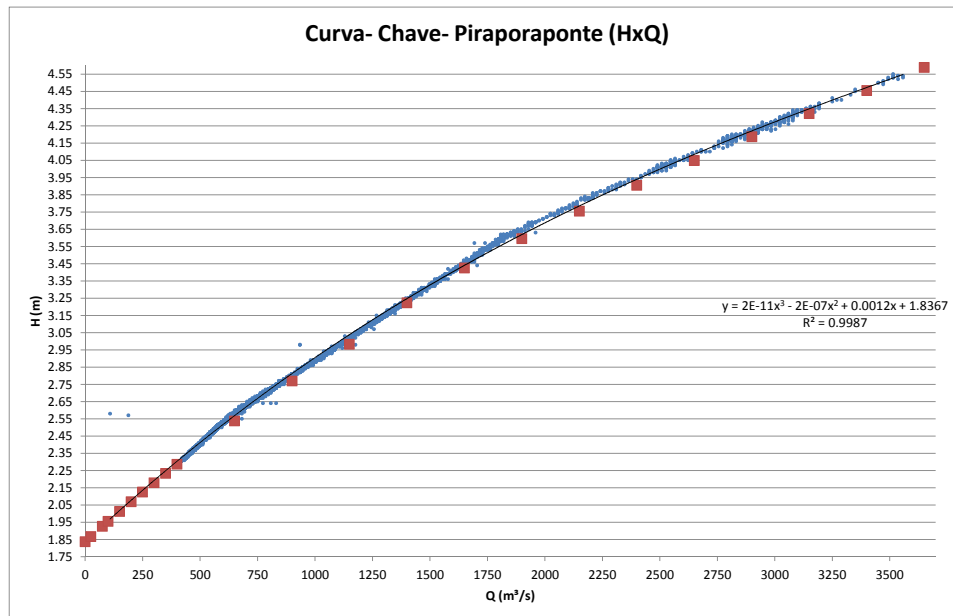


Figura 37 – Curva-Chave para Pirapora Ponte (HxQ)

A equação usada para conversão dos dados de vazão para dados do nível em metros foi:

$$H_{rel} = 2^{-11}Q^3 - 2^{-7}Q^2 + 1.2^{-3}Q + 1.8367 \quad (10.1)$$

$$H = H_{rel} + Datum \quad (10.2)$$

Onde  $H_{rel}$  é a nível do rio relativo em metros e  $H$  é o nível do rio absoluto em metros,  $Q$  é vazão em  $m^3/s$ . O valor para o *datum* adotado foi de 481.38 metros.

#### 10.3.4 RTC-Tools

A característica modular e personalizável do RTC-Tools permite diversas configurações, sendo possível utilizar diferentes equações governantes para solucionar problemas de canais superficiais abertos. Para o caso de estudo foram feitas três configurações diferentes: 1 usando Cascata de Reservatórios (RR) aplicando a correção de *Integrator Delay* (ID) de (SCHUURMANS, 1997) e 2 configurações utilizando onda cinemática (DW) sequencial implícita e *upwind*,

porém com duas resoluções espaciais diferentes, a com a resolução espacial mais esparsa será denominada como de malha grosseira e a com maior resolução espacial será denominada de malha refinada.

Para o RTC-Tools ainda não há método de calibração automática, os valores utilizados foram calibrados manualmente baseados nos dados e relatórios de simulação gerados pelo SOBEK.

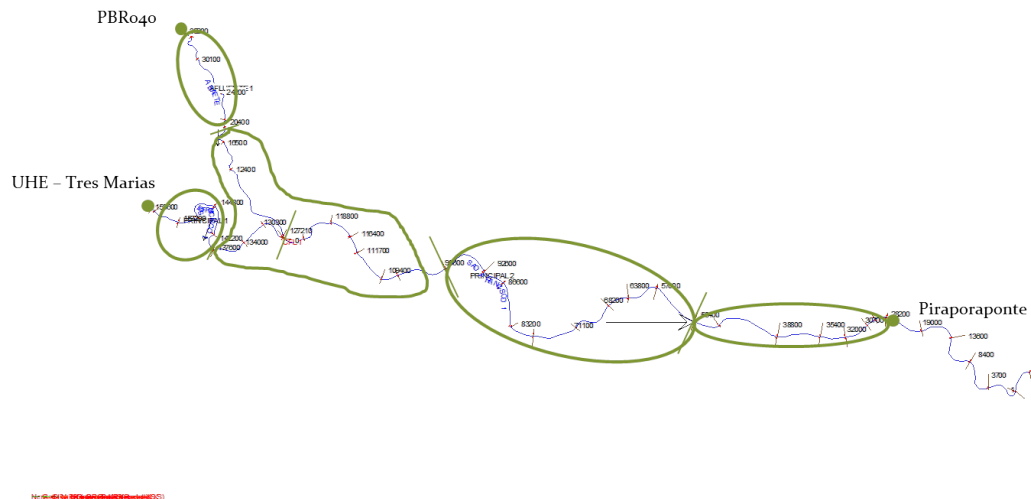


Figura 38 – Esquema da configuração para onda difusa com resolução espacial grosseira

### Onda Difusiva com Baixa Resolução Espacial - Diffusive Wave-Coarser (DW30km)

Os valores de volume de armazenamento da seção do rio e comprimento foram obtidas dos resultados da simulação usando o modelo totalmente dinâmico SOBEK, as seções transversais foram utilizadas conforme os dados geométricos do Apêndice A. Foram configurados ao todo 6 seções transversais, que para esta configuração de Onda Difusiva estão aproximadamente

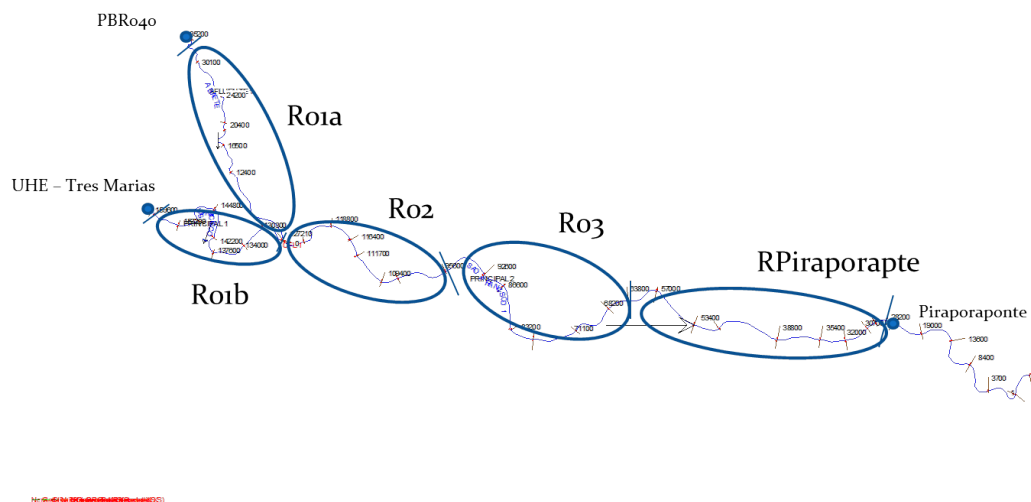


Figura 39 – Esquema da configuração para cascata de reservatórios

a cada 30km distantes entre si. Na Tabela 18, mostra os nós configurados e suas geometrias correspondentes; as distâncias entre cada nó está descrito na tabela Tabela 19.

Tabela 18 – Seções transversais correspondentes aos nós do modelo difusivo com resolução grosseira (DW30km)

Nome do Nó	Nome do Rio	Tipo de Nó	Nome da Seção Transversal
PBR040	Rio Abaetés	Condição de Contorno de Entrada (Vazão)	RA35200
Tres Marias	Rio São Francisco 1	Condição de Contorno de Entrada (Vazão)	SF159600
N01	Rio São Francisco 2	Nó de Junção de Seções	SF127190
N02	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF92600
N03	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF44700
Piraporaponte	Rio São Francisco 2	Condição de Contorno de Saída (Vazão)	SF29000

Tabela 19 – Comprimento entre as seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW30km)

Nome da Seção	Nome do Rio	Comprimento (m)
PBR040-N01	Rio Abaetés	35121.56
Tres Marias-N01	Rio São Francisco 1	29915.63
N01-N02	Rio São Francisco 2	34707.44
N02-N03	Rio São Francisco 2	31840.73
N03-Piraporaponte	Rio São Francisco 2	34779.3

O único valor que foi Calibrado foi a rugosidade dos canais, como não há ainda uma calibração automatizada para o RTC-Tools, esta calibração foi feita manualmente tendo como referência os valores calibrados no SOBEK. Os valores adotados para a rugosidade estão apresentados na Tabela 20.

A única diferença no entanto é que a rugosidade no RTC-Tools é dada por Chézy:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (10.3)$$

Onde  $C$  é o coeficiente de Chézy em  $m^{1/2}/s$ ,  $R$  é o raio hidráulico em (m) e  $n$  é o coeficiente de *Manning*.

Os valores dos comprimentos da seção molhada em relação a cota e armazenamento das seções consideradas para a configuração estão detalhadas no Apêndice E.

Tabela 20 – Rugosidade das seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW30km)

Nome da Seção	Cota (m)	Chezy ( $m^{1/2}/s$ )
PBR040-N01	544.67	45
	545.3	45
	546.6	40
	549.17	40
Tres Marias-N01	509.57	45
	510.2	45
	511.5	40
	514.07	40
N01-N02	500.6	45
	501.23	45
	502.53	40
	505.1	40
N02-N03	490.64	45
	491.27	45
	492.27	40
	495.14	40
N03-Piraporaponte	483.07	45
	483.7	45
	485	40
	487.57	40

### Onda Difusiva com Alta Resolução Espacial - Diffusive Wave-Finer (DW10km)

Assim como na configuração anterior para a configuração com a malha refinada, os valores de volume de armazenamento da seção do rio e comprimento foram obtidas dos resultados da simulação usando o modelo totalmente dinâmico SOBEK, as seções transversais foram utilizadas conforme os dados geométricos do Apêndice A. Foram configurados ao todo 14 seções transversais, que para esta configuração de Onda Difusiva estão aproximadamente a cada 10km distantes entre si. Na Tabela 18, mostra os nós configurados e suas geometrias correspondentes; as distâncias entre cada nó está descrito na tabela Tabela 22.

O único valor que foi Calibrado foi a rugosidade dos canais, como não há ainda uma calibração automatizada para o RTC-Tools, esta calibração foi feita manualmente tendo como referência os valores calibrados no SOBEK. Os valores adotados para a rugosidade estão apresentados na Tabela 23.

Os valores dos comprimentos da seção molhada em relação a cota e armazenamento das seções consideradas para a configuração estão detalhadas no Apêndice F.

Tabela 21 – Seções transversais correspondentes aos nós do modelo difusivo com resolução refinada (DW10km)

Nome do Nó	Nome do Rio	Tipo de Nó	Nome da Seção Transversal
PBR040	Rio Abaetés	Condição de Contorno de Entrada (Vazão)	RA35200
Tres Marias	Rio São Francisco 1	Condição de Contorno de Entrada (Vazão)	SF159600
N01a	Rio São Francisco 1	Nó de Cálculo	SF148800
N01b	Rio São Francisco 1	Nó de Cálculo	SF153200
N01	Rio São Francisco 2	Nó de Junção de Seções	SF127190
N02a	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF116400
N02b	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF102500
N02	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF92600
N03a	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF77200
N03b	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF68200
N03	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF53400
N Pa	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF38800
N Pb	Rio São Francisco 2	Nó de Cálculo	SF32000
Piraporaponte	Rio São Francisco 2	Condição de Contorno de Saída (Vazão)	SF29000

Tabela 22 – Comprimento entre as seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW10km)

Nome da Seção	Nome do Rio	Comprimento (m)
PBR040-N01	Rio Abaetés	35121.56
Tres Marias-N01a	Rio São Francisco 1	17040.2
N01a-N01b	Rio São Francisco 1	11007.1
N01b-N01	Rio São Francisco 2	11868.33
N01-N02a	Rio São Francisco 2	11533.17
N02a-N02b	Rio São Francisco 2	9438.95
N02b-N02	Rio São Francisco 2	13735.32
N02-N03a	Rio São Francisco 2	12420.6
N03a-N03b	Rio São Francisco 2	12087.65
N03b-N03	Rio São Francisco 2	14161.89
N03-N Pa	Rio São Francisco 2	12287.08
N Pa- N Pb	Rio São Francisco 2	9276.7
N Pb-Piraporapte	Rio São Francisco 2	6386.11

## Reservoir Routing

Esta configuração é relativamente simples o trecho modelado foi dividido em três volumes de controle, que são os chamados "reservatórios" sendo que cada volume apresenta duas tabelas sendo que uma relaciona cota (m) com o volume de armazenamento ( $m^3$ ) para a seção e outra que relaciona cota (m) e a vazão para a seção em ( $m^3/s$ ). Os valores destas tabelas para as seções estão detalhadas no Apêndice G.

Tabela 23 – Rugosidade das seções para o modelo difusivo com resolução grosseira (DW10km)

Nome da Seção	Cota (m)	Chezy ( $m^{1/2}/s$ )	Nome da Seção	Cota (m)	Chezy ( $m^{1/2}/s$ )	Nome da Seção	Cota (m)	Rugosidade
PBR040-N01a	544.67	45	-	-	-	-	-	-
	545.3	45	-	-	-	-	-	-
	546.6	40	-	-	-	-	-	-
	549.17	40	-	-	-	-	-	-
Tres Marias-N01a	509.57	45	N01a-N01b	505.64	45	N01b-N01	502.99	45
	511.18	45		508.18	45		503.5	45
	511.37	40		510.56	40		504.15	40
	514.67	40		512.52	40		507.64	40
N01-N02a	500.6	45	N02a-N02b	494.92	45	N02b-N02	493.32	45
	502.18	45		495.75	45		494.52	45
	504.8	40		497.95	40		495.9	40
	505.42	40		500.93	40		498.81	40
N02-N03a	490.64	45	N03a-N03b	487.65	45	N03b-N03	485.36	45
	490.87	45		489.06	45		485.69	45
	491.29	40		490.19	40		487.90	40
	495.33	40		492.95	40		490.44	40
N03-N Pa	483.75	45	N Pa-N Pb	482.00	45	N Pb-Piraporaponte	481.20	45
	484.01	45		483.05	45		482.88	45
	484.31	40		483.80	40		483.49	40
	487.67	40		486.26	40		485.07	40

Os valores de volume de armazenamento foram obtidos através dos resultados do SOBEK, as cotas das geometrias do rio conforme o Apêndice A, já as vazões foram obtidas para cada volume através dos dados obtidos do SOBEK que relacionam a área da seção molhada com a velocidade de escoamento.

Tabela 24 – Delimitações dos Volumes de Controle "Reservatórios" para a configuração de Cascata de Reservatórios

Nome do Volume	Nome do Rio	Seção Inicial	Seção Final (Seção de Controle)
R01a	Rio Abaetés	RA35200	RA0
R01b	Rio São Francisco 1	SF159600	SF127210
R02	Rio São Francisco 2	SF127190	SF95600
R03	Rio São Francisco 2	SF92600	SF63800
RPiraporapte	Rio São Francisco 2	SF57000	SF29000

Outro valor importante para esta configuração é o tempo de defasagem para da vazão entre os volumes do rio, estes volumes estão expressos em unidade de tempo de simulação e por isso mudam e devem ser recalculados conforme a resolução espacial de simulação muda.

Tabela 25 – Defasagem Temporal em unidades de tempo para Vazões entre os "Reservatórios" para as intervalos de simulação de 60, 30 e 10 minutos

Seção	Defasagem (unidade de tempo)		
	60 min	30 min	10 min
R01a-R02	2.75	5.5	16.5
R01b-R02	1.25	2.5	7.5
R02-R03	3	6	18
R03-RPiraporapte	7	14	42

## 10.4 Configuração do IPOPT

Para o estudo de caso de UHE-Três Marias o problema de otimização é configurado usando a abordagem sequencial. Em seguida, um modelo adjunto é utilizado para fornecer o gradiente da função objetivo para um otimizador não-linear eficiente baseado em gradiente, neste caso no IPOPT (WÄCHTER; BIEGLER, 2006), e em seguida obtém-se as variáveis de controle sobre o horizonte de previsão.

Para formular o problema então foi definido duas constantes a serem controladas, o nível do reservatório e a vazão defluente da barragem em dois pontos de controle: Vazão no ponto de controle em Pirapora e Vazão defluente da UHE-Três Marias.

Então como uma *hard constraint*, ou restrição inflexível, a qual nunca deve ser ultrapassada o valor do nível máximo normal do reservatório 572,50 metros e o mínimo normal 549,20 metros, a outra restrição inflexível foi a vazão mínima defluente da UHE definida como 460  $m^3/s$ . Os valores máximos de vazão de saída da UHE e vazões em Pirapora foram definidas como uma *soft constraint*, ou restrição flexível, aquela que pode ser desobedecida, mas se o fizer deve haver uma penalidade, neste caso são os valores de ponderamento, então quanto maior o valor do ponderamento, mais grave é a infração da restrição.

Tabela 26 – Restrições Inflexíveis definidas no Otimizador

Variável	Valor Mínimo	Valor Máximo
Nível de Operação da Barragem (m)	549,20	572,50
Vazão defluente da Barragem ( $m^3/s$ )	460	-

Tabela 27 – Restrições Flexíveis definidas no Otimizador

Variável	Valor de Referência	Penalidade se for Menor que o valor	Penalidade se for Maior que o valor
Q defluente da UHE ( $m^3/s$ )	500	0.1	-
	800	-	0.001
Q em Pirapora ( $m^3/s$ )	2.000	-	0.01
	3.000	-	1.0

## 10.5 Modelos Internos

Conforme visto no capítulo 6, para realizar as previsões dos estados futuros do sistema, um MPC precisa utilizar um modelo interno que será rodado iterativamente dentro da otimização para obter as variáveis de controle que minimizam a função objetivo. O modelo interno no RTC-Tools é baseado nos processos de escoamento descritos tanto pelos modelos de onda cinemática, pelo modelo de onda difusiva e pelo modelo de cascata de reservatórios.

As equações governantes serão as ESVs; que descrevem o comportamento de não-estacionário de corpos d' água superficiais, estas que consistem de um grupo de equações usadas para solucionar os princípios físicos baseados nas propriedades de massa e conservação de movimento. O sistema original tridimensional de Navier-Stokes, podem ser reduzidos para um sistema unidimensional após descartados a velocidade em termos ortogonais à direção do fluxo Equação 5.5.

Para acelerar a solução ótima, é dado o gradiente da função objetivo para cada variável de controle do otimizador. O modelo adjunto melhora a computação de cada componente diferencial deste gradiente, uma vez que ele fornece um procedimento no qual as derivadas parciais da função objetivo serão computadas somente uma única vez para cada variável (GRIENWANK; WALTHER, 2008). Isto é feito através do cálculo reverso de diferenciação algorítmica dos derivativos da função objetiva. Os valores adjuntos correspondem ao total das derivadas da função objetiva para cada variável.

Considerando que os estados do sistema são definido por uma formulação explícita, então para cada intervalo de tempo  $k$  os valores adjuntos podem ser obtidos através de:

$$v_{k-1}^{\bar{}} = \frac{\partial J}{\partial v_{k-1}} + \bar{x}_k \cdot \frac{\partial x_k}{\partial v_{k-1}} \quad (10.4)$$

onde  $v$  representa qualquer variável do modelo interno ( $x, u, \text{ou } d$ );  $J$  é a função objetiva



# 11 Indicadores de Desempenho

Para avaliar as simulações selecionou-se dois tipos de indicadores: indicadores de desempenho de processamento e indicadores de desempenho estatísticos. O primeiro grupo de indicadores tem como objetivo avaliar o esforço computacional para as simulações através do tempo gasto para realiza-las e o custo computacional relativo destas simulações. Já o segundo grupo será utilizado para avaliar a confiabilidade dos resultados das simulações frente aos dados observados; ou seja avaliar a precisão dos resultados em simular os dados observados na Tabela 28 estão listados o grupos e os indicadores.

Tabela 28 – Indicadores de Performance Computacional e Estatísticos utilizados para avaliar os resultados.

Sigla Adotada	Unidade	Descrição
Performance Computacional		
<i>CPU Time</i>	ms	Tempo total de processamento
<i>CPU Time/Time Step</i>	s/s	O tempo relativo de processamento
Performance Estatística		
Bias	m <sup>3</sup> /s	Verifica se as quantidades medidas são iguais
RMSE	m <sup>3</sup> /s	Magnitude do resíduo da amostra
R <sup>2</sup>	-	Ajuste Geral das Curvas
NSE	-	Plotagem da Variância Residual pela Variância dos Dados

O *CPU Time* ou tempo de processamento foi obtido dos arquivos de texto e relatórios gerados pelos modelos após a conclusão das simulações. Este tempo de processamento de dados para as simulações pode ser dividido em três partes: O tempo de entrada/ saída para ler os arquivos texto, tempo usado para processar e simular os dados e novamente mais um tempo entra/saída para registrar os resultados em disco. É um dado absoluto medindo o tempo total de processamento da simulação.

O próximo indicador de performance utilizado foi de *CPU Performance/Time Steps*, que servirá para medir quanto poder de processamento relativo, ou seja quanto tempo de processamento é necessário para processar cada intervalo de tempo de simulação. É importante lembrar que as simulações que definem o tempo implicitamente, não podem ser avaliadas por este indicador.

$$CPUtime/TimeStep = \frac{\Delta t}{N} \quad (11.1)$$

Nesta equação  $\Delta t$ , corresponde ao tempo total necessário para completar a simulação e

$N$  corresponde ao número de intervalos de tempo de simulação ou simplesmente o número de dados simulados.

Para analisar a precisão dos resultados de simulação foram selecionados quatro indicadores de performance: Tendência (*Bias*), Erro Médio Quadrático (RMSE), Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE):

A tendência ou (*Bias*) é uma função que estima a diferença entre os valores medidos e simulados. Um valor igual a zero é considerado sem viés. A tendência de uma equação é da pela Equação 11.2

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_i^N (\hat{x}_i - x_i) \quad (11.2)$$

Onde  $N$ , corresponde ao número de pontos de dados,  $\hat{x}$  são os valores calculados e  $x$  corresponde aos valores observados ou ao valor de referência.

O Erro médio quadrático (RMSE) ou Erro da Raiz Quadrada da Média ao Quadrado, mede a magnitude do erro em uma função periódica, ou seja que não é estável, indicando o a variância dos residuais, medindo o ruído da amostra. Um RMSE igual a zero indica um ajuste perfeito o RMSE é calculado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (11.3)$$

Onde  $N$ , corresponde ao número de pontos de dados,  $\hat{x}$  são os valores calculados e  $x$  corresponde aos valores observados ou ao valor de referência.

A *Correlação de Pearson* ou Coeficiente de Correlação ou simplesmente  $R^2$ , serve assim como o RMSE para representar o grau de colinearidade entre o dados simulados com os observados, servindo para medir a proporção de ajuste da amostra. O valor do  $R^2$  varia de 0 até 1, sendo um  $R^2$  igual a zero correspondente a nenhuma relação entre os dados existe e um valor próximo a 1, significa uma perfeita relação entre os dados. O coeficiente é calculado conforme:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_i^N (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}_i)((x_i - \bar{x}_i))}{\sqrt{\sum_i^N (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}_i)^2} \sqrt{\sum_i^N (x_i - \bar{x}_i)^2}} \right)^2 \quad (11.4)$$

Onde,  $N$ , corresponde ao número de pontos de dados,  $\hat{x}$  são os valores calculados,  $\bar{\hat{x}}$  a

---

media dos valores calculados,  $x$  corresponde aos valores observados ou ao valor de referência e  $\bar{x}$  a media dos valores observados.

O modelo de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma estatística normalizada utilizada para indicar o ajuste entre valores estimados com valores de referência, determinando a magnitude da variância residual, ou ruído comparado com a variância dos valores observados ou de referência. Ele indica o quão bem ajustado é a plotagem de dados observados contra os simulados. A faixa de valores para o NSE varia entre  $-\infty$  e 1. Um NSE igual a 1 indica que os valores simulados são exatamente iguais aos observados, valores entre 1 e zero são considerados aceitáveis e valores negativos indicam que a média do valor observado é uma estimativa melhor do que sua simulação. A fórmula para o NSE é dada por:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^N (\hat{x}_i - x_i)^2}{\sum_i^N (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (11.5)$$

Onde,  $N$ , corresponde ao número de pontos de dados,  $\hat{x}$  são os valores calculados,  $x$  corresponde aos valores observados ou ao valor de referência e  $\bar{x}$  a media dos valores observados.



Parte V

Resultados & Discussão



## 12 Resultados

Na avaliação dos resultados e desempenho computacional dos modelos selecionados, foram realizadas diversas simulações de forma permitir avaliar como as diferentes versões das ESV e/ou diferentes configurações espaciais e temporais impactam o tempo de processamento das simulações e a precisão dos resultados.

Tabela 29 – Modelos e Períodos de Simulações dos Resultados.

Modelos Utilizados	Data de Início de Simulação	Data Final de Simulação
SPRNT e SOBEK	19/06/2006 21:00	22/09/2006 06:00
$\Delta$ espacial - RTC-Tools		
$\Delta$ temporal - RTC-Tools	15/01/2007 21:00	20/06/2011 00:00
SOBEK, MGB-IPH e RTC-Tools		

Na Tabela 29, estão listados os modelos e configurações e respectivos períodos utilizados nas simulações, ao todo foram feitas 3 análises; comparação do SOBEK em relação ao SPRNT; avaliação dos impactos da resolução espacial; avaliação da resolução temporal e por último comparação entre o SOBEK, MGB-IPH e RTC-Tools.

A primeira é uma comparação dos modelos totalmente dinâmicas (SOBEK e o SPRNT), nesta avaliação utilizou-se dados diários para o período de 19/06/2006 às 21:00 até 22/09/2006 às 06:00. A segunda e a terceira simulações foram feitas para avaliar como a resolução espacial e temporal impactam os resultados dos modelos e seu desempenho computacional e a última simulação envolveu os mais modelos e configurações que obtiveram melhor desempenho nas simulações anteriores (SOBEK, Cascata de Reservatórios Horário e Onda Difusiva com resolução espacial refinada também horário) em relação ao MGB-IPH. Para estas 3 simulações foi utilizado período entre 15/01/2007 21:00 até 20/06/2011 00:00.

Tabela 30 – Cenários e Períodos de Otimizações.

Modelos Utilizados	Cenário de Otimização	Data de Início	Horizonte de Otimização
RTC-Tools acoplado no Otimizador	Situação Normal	19/01/2008 20:00	1 ano
	Condição de Estiagem	31/08/2008 00:00	

A seguir realizou-se simulações de problemas de otimização integrando o modelo mais apto, obtido da análise das simulações anteriores, ao otimizador IPOPT. Na Tabela 30 estão listados os períodos e horizontes de previsão que foram utilizados nos 2 cenários de otimização. Estes cenários tem como intuito demonstrar as capacidades do modelo em ser executado em conjunto com um otimizador para aplicações de SSD para operação de reservatórios e controle de cheias em tempo real.

## 12.1 SOBEK x SPRNT

Conforme dito anteriormente foi feita uma comparação entre os dois modelos que utilizam a Equação Totalmente Dinâmica de Saint-Venant para simular a descarga em canais abertos. Nesta comparação, os modelos não foram integrados ao Delft-FEWS e portanto não receberam a correção de contribuição de descarga lateral.

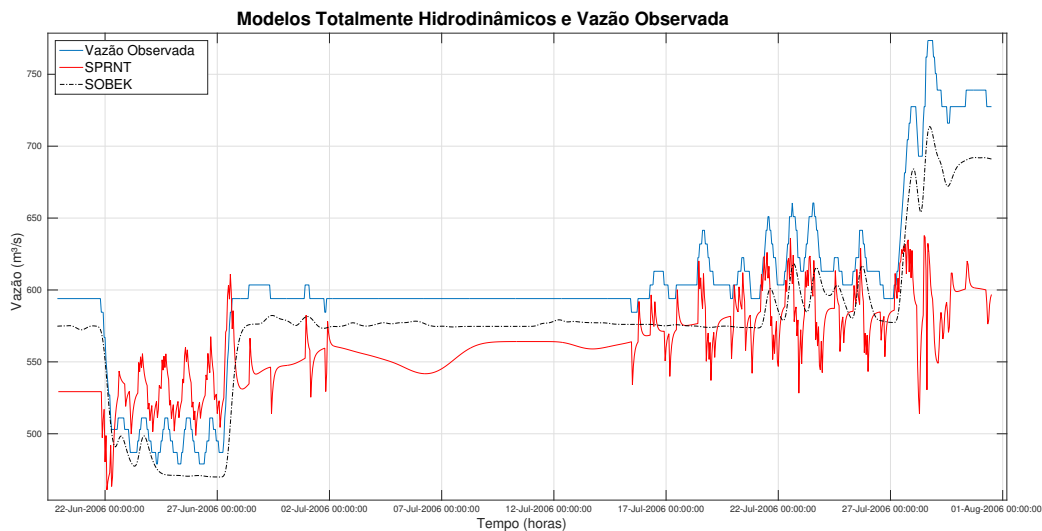


Figura 40 – Comparação do modelo SPRNT com o SOBEK.

Observando a Figura 40, os resultados do SOBEK, aqui são claramente superiores comparados com os resultados do SPRNT, ambos os modelos apresentam volume de água inferior ao observado, que pode ser explicado pela falta da contribuição lateral e o sinal gerado pelo SPRNT, muito embora responda as variações de vazão observadas, não consegue simular o formato ou a ordem de grandeza das simulações.

Tabela 31 – Gasto Computacional e Performance dos modelos totalmente dinâmicos sem implementação de contribuições laterais (SOBEK & SPRNT).

Modelo	Tempo de Processamento (s)	Bias	RMSE	NSE	R <sup>2</sup>
SPRNT	4,92	-23,25	66,22	0,12	0,25
SOBEK	32,16	-21,24	26,26	0,83	0,978

Na Tabela 31, a falta de contribuição lateral influencia o Bias de ambos os modelos deixando-o negativo levando em consideração que nestas métricas aqui utilizadas não estão com contribuição de vazão lateral por isso as estatísticas (BIAS) baixo nos dois modelos. Ambos os modelos apresentam um RMSE alto, já em relação ao encaixe das curvas mostram claramente que o SPRNT não conseguiu simular corretamente os resultados.

No entanto comparando os tempos de processamento dos dois modelos, o SPRNT que utiliza técnicas de aceleração de processamento foi muito superior ao SOBEK, sendo capaz de calcular a mesma série de dados XX vezes mais rápido. Porém este tempo real para obter os dados



do SPRNT é maior pelo fato de que ele não está implementado no Delft-FEWS, dependendo de uso de softwares terceiros para importar, extrair e visualizar os dados gerados.

## 12.2 Impacto da Resolução Espacial

Na Figura 41, estão plotadas as duas curvas dos modelos de onda difusa, uma menos detalhada (DW-30km) e outra mais detalhada (DW-10km), podemos ver claramente que a resolução espacial mais refinada melhorou os gráficos, o *timing* da configuração mais detalhada esta mais correto, a outra menos detalhada apresenta um atraso no picos, além disto, os picos conseguem reproduzir mais corretamente os picos observados, no entanto ambas apresentam um amortecimento significativo dos sinais, principalmente nas seções onde existem variações curtas e rápidas decorrentes de um comportamento típico de operação de reservatórios, o sinal da onda difusa demora a responder este tipo de variação.

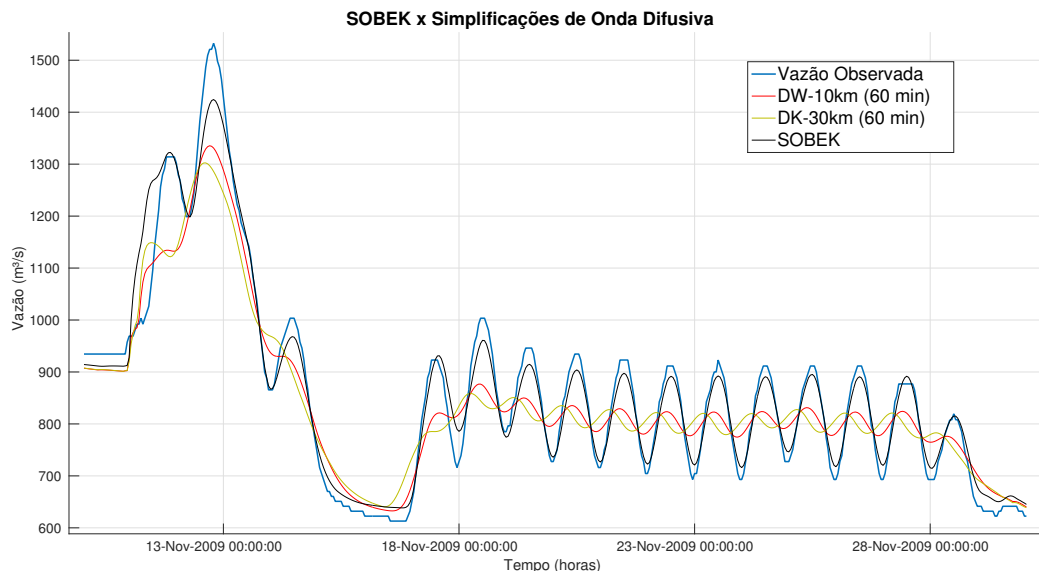


Figura 41 – Modelo Totalmente dinâmico (SOBEK) e Modelos de Onda Difusiva (Diffusive Wave - DW).

Observa-se também na Figura 41, que ao comparar o modelo totalmente hidrodinâmico, que tem a maior resolução espacial, com os que utilizam uma simplificação espacial e de equação governante, é possível notar que os modelos simplificados apresentam atenuações nos picos e uma menor resposta do sinal. Em termos de operação de reservatórios este comportamento é desvantajoso, pois o modelo pode não estimar corretamente a magnitude ou a rapidez de um evento de inundação, subestimando-o ou errando o tempo que ocorrerá.

## 12.3 Impacto da Resolução Temporal

O próximo passo foi de verificação se a variabilidade temporal poderia corrigir os comportamentos indesejados observados na seção anterior. Os modelos de Cascata de Reservatórios

(RR), Onda Difusa com resolução espacial pouco detalhada (DW-30km) e Onda Difusa Detalhada (DW-10km). Novamente variou-se o intervalo temporal de simulações utilizando (10, 20, 30, 40 e 60 minutos).

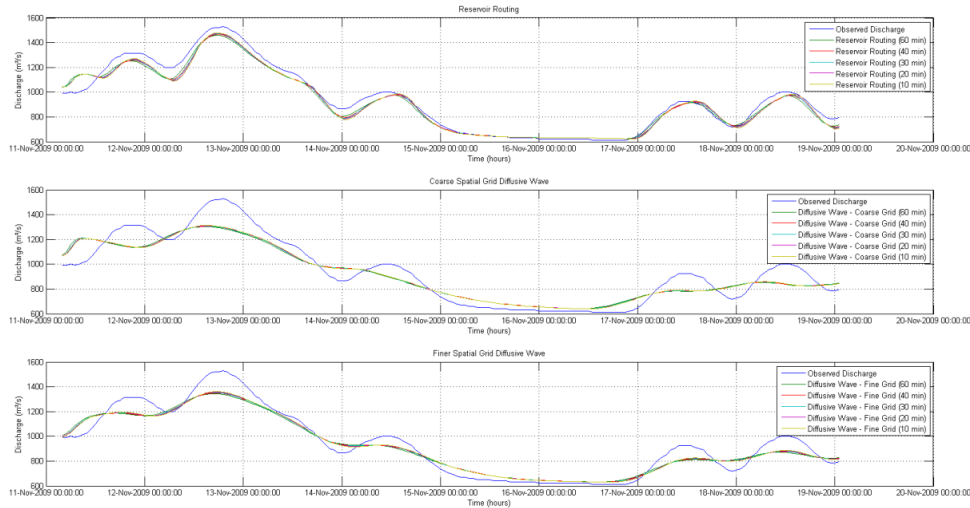


Figura 42 – Comparação dos Modelos Conforme a Variação Espacial e Temporal.

Na Figura 42, estão apresentados os sinais das configurações dos modelos acima descritos variando temporalmente. Podemos ver que houve uma latente melhora nos resultados, mas a evolução dos resultados conforme a escala temporal diminuía foi visualmente marginal, não conseguindo corrigir o amortecimento dos picos.

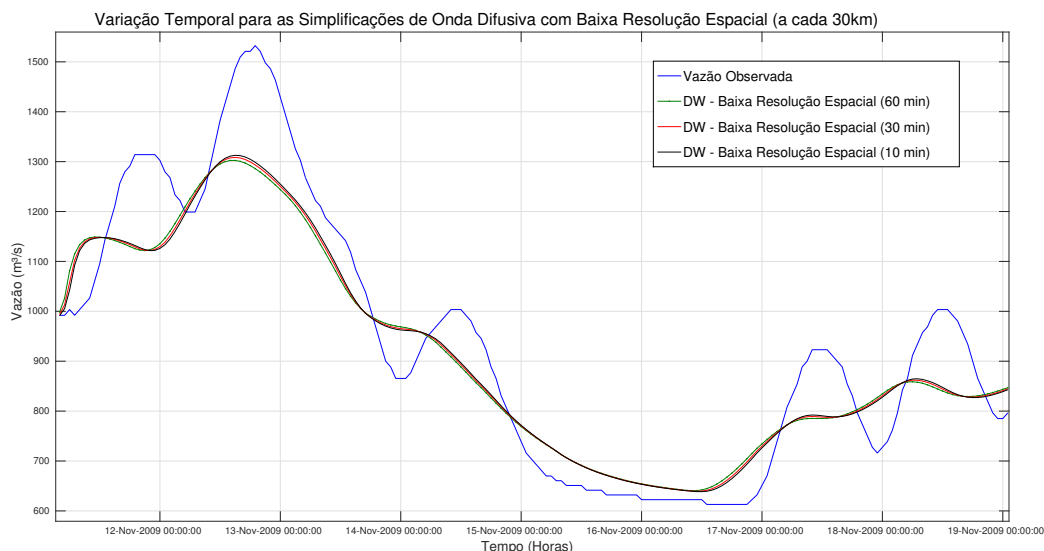


Figura 43 – Comparação das simulações adotando intervalos de tempo de de 10, 30 e 60 min - Onda Difusiva com Baixa Resolução Espacial (Diffusive Wave -DW30km).

Analisando somente o comportamento do impacto da variabilidade temporal 10, 30 e 60 minutos no modelo de Onda Difusiva com baixa resolução espacial, o modelo menos detalhado na Figura 43, podemos ver que embora o aumento da resolução tenha melhorado os resultados,

esta melhora no das curvas foi pequeno, havendo uma reprodução melhor dos picos e no tempo das curvas, mas há pouca diferença entre a simulação horária para a simulação a cada 10 minutos.

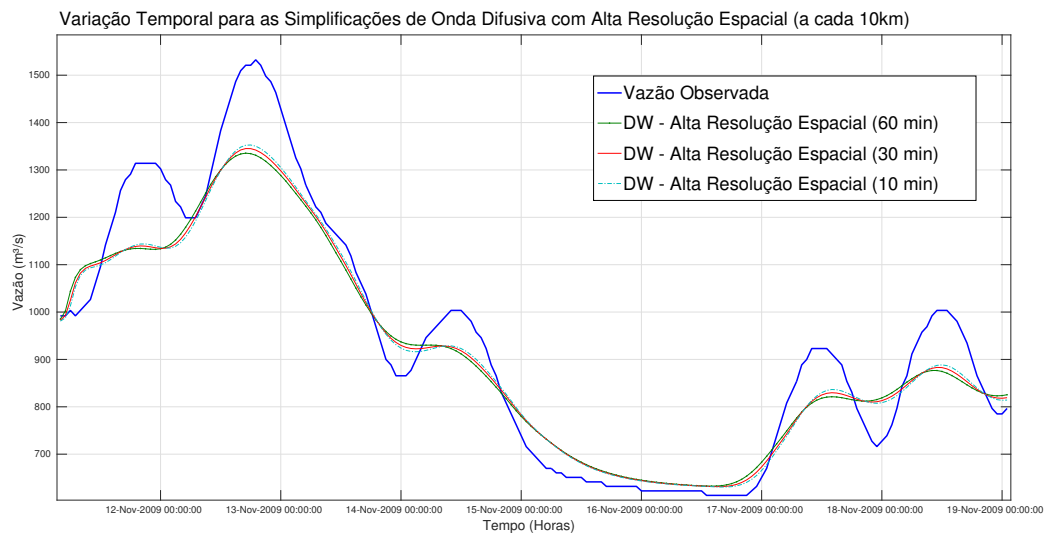


Figura 44 – Comparação das simulações adotando intervalos de tempo de de 10, 30 e 60 min - Onda Difusiva com Alta Resolução Espacial (Diffusive Wave -DW10km).

Na Figura 44, temos os resultados da variação temporal (10, 30 e 60 minutos) para o modelo de Onda Difusiva mais detalhado com nós de cálculo a cada 10km. Embora haja uma melhora visual dos picos e no comportamento do sinal, assim como na figura anterior houve pouca diferença entre o modelo de 60 minutos para o modelo de 10 minutos.

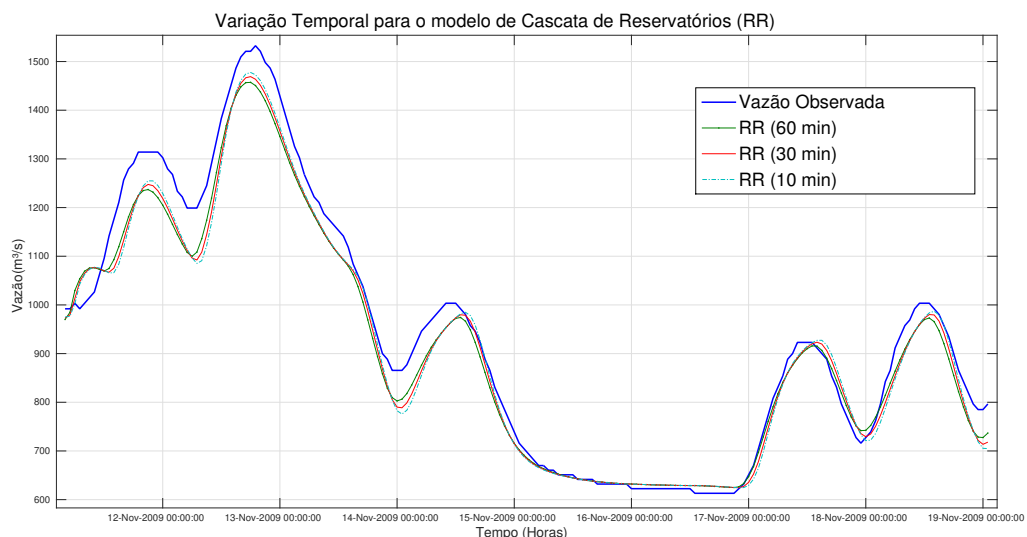


Figura 45 – Comparação das simulações adotando intervalos de tempo de de 10, 30 e 60 min - Cascata de Reservatórios (Reservoir Routing -RR).

Por último analisando a Figura 45, para o modelo de Cascata de Reservatórios, podemos ver que o modelo tem um comportamento melhor que ambos os modelos de onda difusa (DW-10km e DW-30km), conseguindo reproduzir os picos melhor assim como um ajuste e resposta

melhores à mudanças bruscas do sinal observado. No entanto assim como os modelos anteriores, visualmente houve pouco impacto a variabilidade do intervalo temporal de simulações.

## 12.4 SOBEK X MGB-IPH X RTC-Tools

Nesta simulação foram analisados os modelos SOBEK, que utiliza a versão completa de ESV, o MGB-IPH que utiliza Muskingum-Kunge e o RTC-Tools, este utilizando três configurações diferentes, DW que utiliza a simplificação de Onda Difusa da Equação de Saint-Venant e RR (Reservoir Routing), ou Cascata de Reservatórios que utiliza uma equação equivalente à onda cinética da equação de Saint-Venant. Além disto foi feita a análise do impacto da variação espacial e temporal nos resultados para diferentes configurações do RTC-Tools.

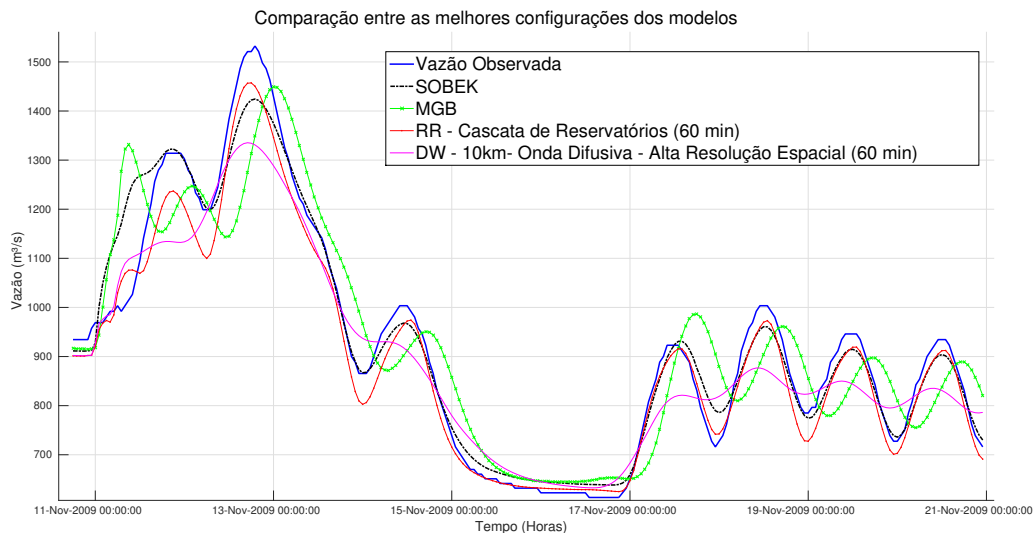


Figura 46 – Comportamento dos modelos em eventos de pico de cheia.

Como não é possível alterar a variação temporal ou espacial do MGB, sem comprometer os resultados obtidos, por isso estes dois não serão analisados quanto sua variabilidade temporal ou espacial. Já para o caso do modelo de Cascata de Reservatórios, também não é possível alterar a variabilidade espacial sem comprometer os resultados.

Portanto para a análise da variação temporal selecionou-se intervalos temporais das simulações de 10 min, 20 min, 30 min, 40 min e 60 min. E para a análise da resolução espacial utilizaram-se duas resoluções espaciais para a onda difusa: uma mais esparsa com um nó de cálculo a cada 30 km (DW-30km) e outra mais concentrada com nós a cada 10 km (DW-10km).

A Figura 46, mostra o comportamento dos modelos quando há picos de vazão, que podem ser importantes no caso de operação de reservatórios visando controle de cheias. podemos ver que o MGB apresenta um atraso nos resultados, que não é desejável para este tipo de aplicação, os modelos de Cascata de Reservatórios e SOBEK apresentaram um resultado similar e o de onda difusa apresentam considerável atenuação dos picos.

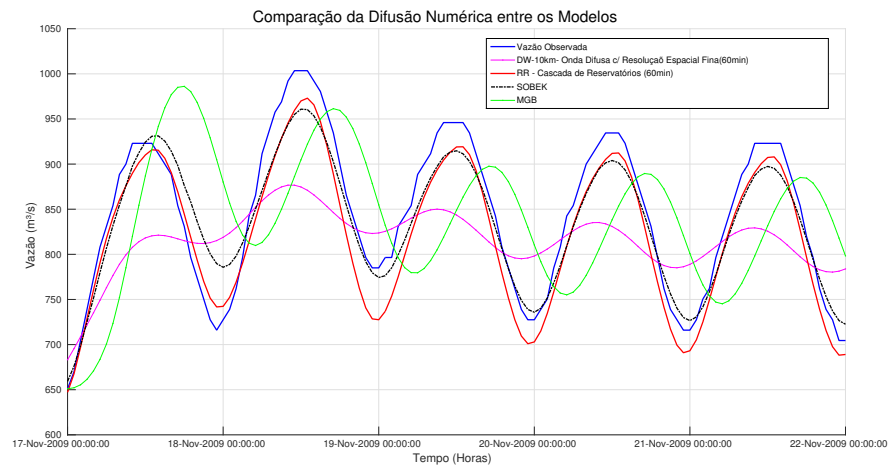


Figura 47 – Difusão Numérico dos modelos em eventos de variações de vazões.

Na Figura 47, podemos ver uma seção com um comportamento típico barragens, onde há num intervalo de tempo rápidas e seguidas mudanças de vazão, resultantes da operação. Podemos ver que o MGB está completamente fora de fase e que o modelo de onda difusa não consegue reproduzir o comportamento, reagindo muito lentamente a estas variações.

## 12.5 Métricas de Desempenho

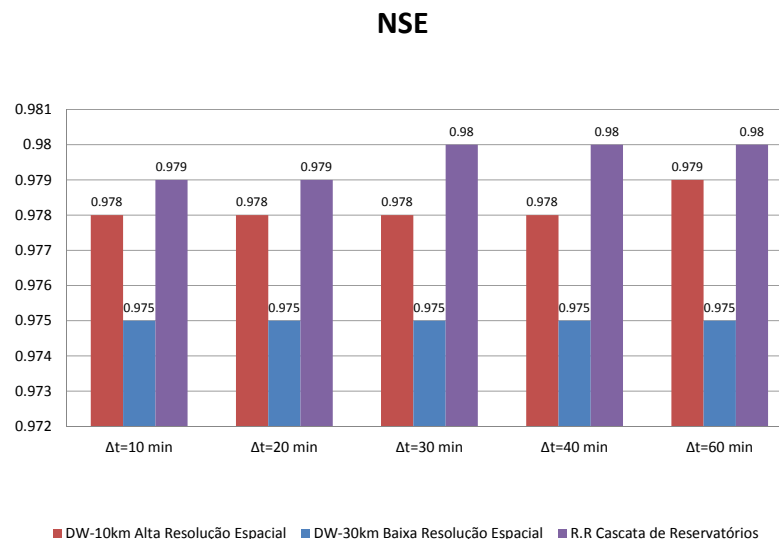


Figura 48 – NSE para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW).

A seguir serão apresentados os valores medidos das métricas estatísticas do Bias, NSE, RMSE e  $R^2$ . De uma maneira geral não houve uma melhora significativa ao aumentar diminuir o intervalo temporal das simulações, os indicadores variaram pouco considerando que o número

simulações feitas entre a simulação horária (60 minutos) e que gera resultados a cada 30 minutos dobra e para o intervalo de simulação menor de 10 minutos o número de simulações sextuplica.

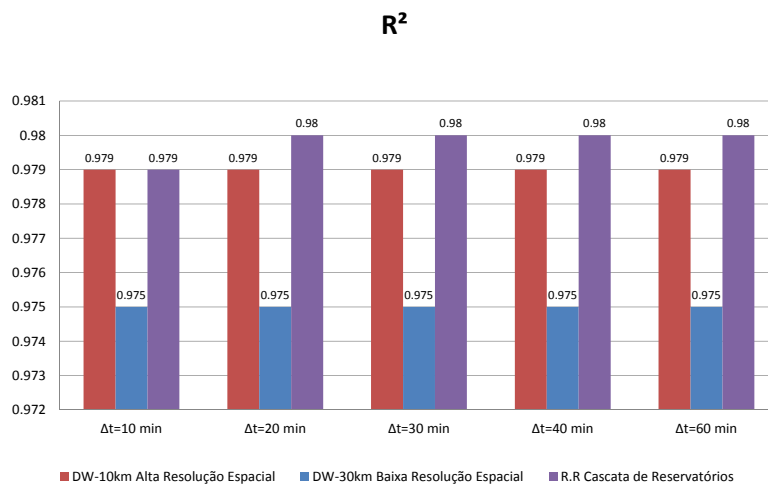


Figura 49 –  $R^2$  para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW).

Os indicadores  $R^2$  e NSE permanecem estáveis e praticamente não foram afetados pelas alterações propostas. Nas figuras 49 e 48, podemos ver uma melhora muito discreta para 10 minutos, mas em compensação uma resolução espacial foi muito mais eficiente para melhoria dos dados, sendo observada nos modelos de Onda Difusa menos e mais detalhados.

No caso do RMSE, para os modelos de Onda Difusa houve uma tendência pequena de melhorar os valores conforme a escala temporal de simulação diminui e para o modelo de Cascata de Reservatórios a tendência não foi observada, os valores se mantiveram praticamente os mesmos. Novamente a variação espacial afeta mais os valores do que a variação temporal (Figura 50).

Na Figura 51 podemos ver que o *Bias* apresentou um comportamento bem evidente, conforme a resolução temporal aumenta, o valor também tende a aumentar para todos os modelos. O balanço de água piorou, visto que os modelos passaram a calcular um volume ligeiramente maior do que o observado. A resolução espacial também causou um impacto maior neste indicador do que a variação no intervalo temporal das simulações; conforme a resolução da malha de nós aumenta de 30km (DW-30km) para 10 km (DW-10km), o valor do *Bias* também aumenta.

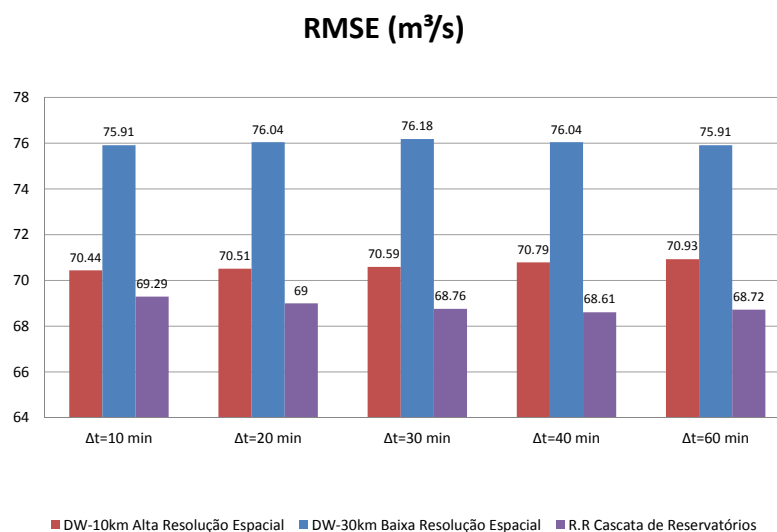


Figura 50 – RMSE para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Diffusiva (DW).

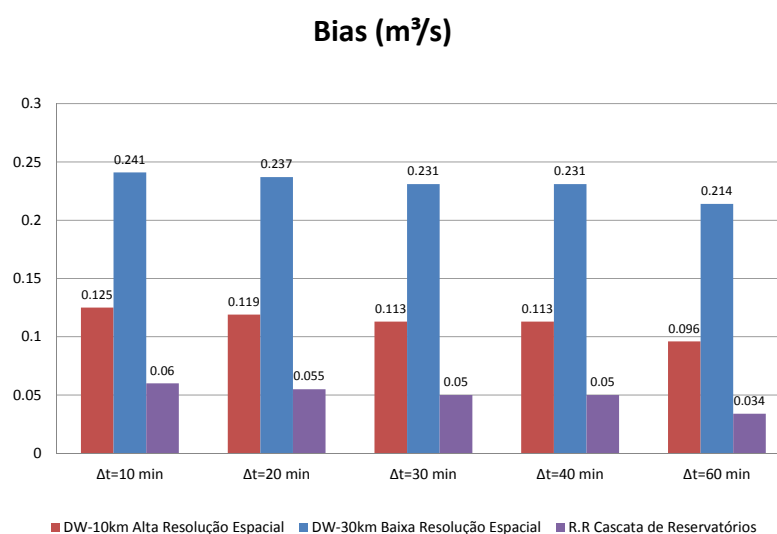
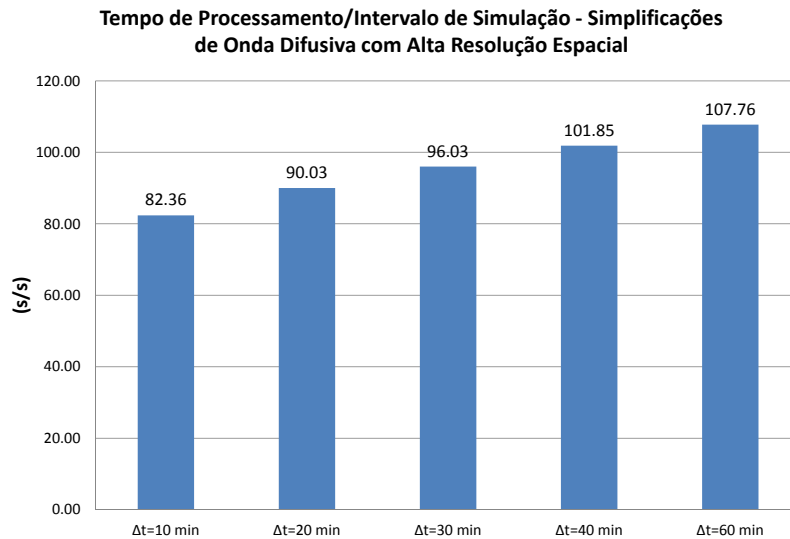


Figura 51 – Bias para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Diffusiva (DW).

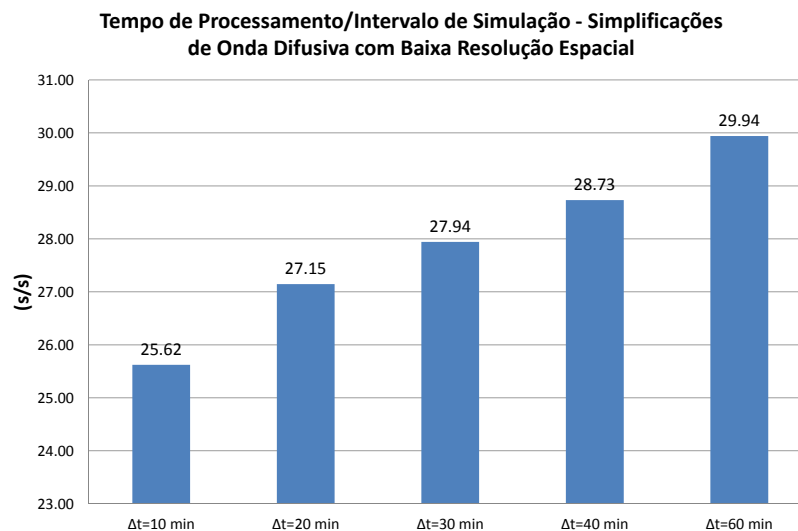
## 12.6 Avaliação de Performance Computacional dos Modelos

Ao avaliar o desempenho computacional, conforme a resolução espacial do intervalo de tempo de simulação diminui (*Time Step*, o tempo de simulação *CPU Time* aumenta isso acontece porque o número de etapas para as simulações aumenta, a configuração de 30 minutos executa o dobro de simulações que a de 60 minutos e a de 10 minutos deve simular 6 vezes mais etapas do

que a de 60 minutos e assim por diante. Desta forma para poder avaliar o custo computacional relativo destas simulações utilizou-se a Equação 11.1. Na Tabela 32, estão apresentados os resultados desta relação para os modelos analisados.



(a) DW 10km



(b) DW 30km

Figura 52 – Custo Relativo de Processamento refinamentos temporais dos modelos de Onda Difusa (DW-10km e DW-30km).

O custo de processamento para os modelos de onda difusa diminuem conforme a escala



temporal diminui, significando que para esta configuração é mais fácil processar intervalos de tempos menores do que intervalos de tempos maiores, já para o modelo RR a tendência foi inversa as escalas temporais menores aumentaram o custo de processamento, muito embora esta diferença seja quase desprezível.

Em relação ao custo de processamento para cada intervalo de simulação (Figura 52), foi observado que ao refinar a resolução temporal foi possível aumentar a eficiência de processamento, ou seja custo relativo para simular um intervalo de tempo de simulação; o aumento desta eficiência foi maior para o modelo com resolução espacial refinada (DW-10km) e ligeira no modelo de alta resolução espacial (DW-30km). Curiosamente esta relação não foi observada no modelo de cascata de reservatórios (RR) (Figura 53), ao contrário dos modelos de onda difusiva, o comportamento se manteve praticamente estável conforme a escala temporal era alterada, sendo que na escala temporal menor (10 min), foi observado uma pequena queda na eficiência.

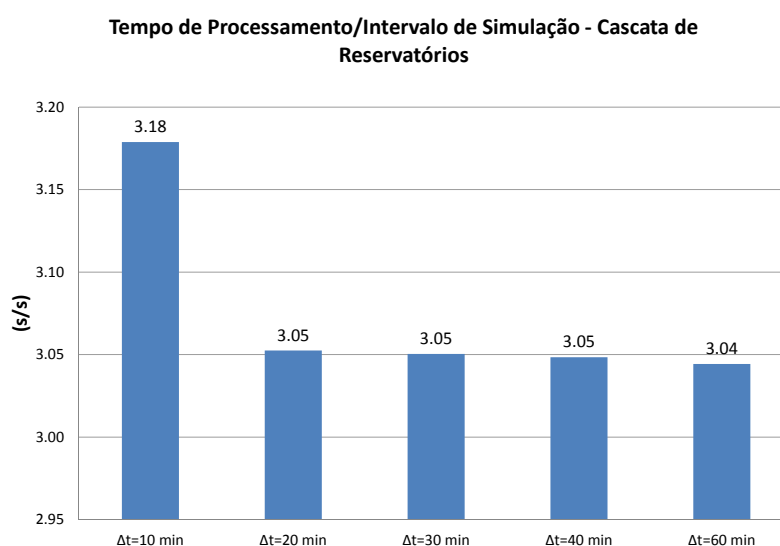


Figura 53 – Custo Relativo de Processamento para refinamentos temporais do modelo de cascata de reservatórios (RR)

Para os modelos de onda difusiva; embora haja aumento absoluto no tempo de processamento conforme a temporal aumenta, observa-se que um aumento de eficiência de processamento, ou seja redução do esforço computacional relativo, ou seja o tempo de processamento necessário para processar uma unidade do intervalo de simulação diminui. O modelo mais refinado usando a escala temporal de 10 minutos necessita de 25,62 segundo para simular 1 segundo do intervalo de simulação, já para uma escala maior 60 minutos seriam necessários 29,94. O mesmo é observado no modelo mais refinado o tempo para 60 minutos é 107,76 segundos para simular 1 segundo do intervalo de simulação reduzindo para 82,36 segundo na escala temporal de 10 minutos.

Já para o modelo de Cascata de Reservatórios (RR) a tendência é inversa aos modelos de onda difusiva, a eficiência de simulação cai ligeiramente sendo 3,04 segundos para um intervalo de 60 minutos e para intervalo de 10 minutos este tempo seria 3,18 segundos.

Tabela 32 – Redução do Custo relativo de processamento para os modelos de onda difusiva e de cascata de reservatórios

Onda Difusiva com alta resolução espacial (DW-10 km)				
$\Delta t$	Tempo de Simulação/Intervalo de Simulação (s/s)	Redução		
		(s/s)	%	
60	107,76	-	-	
40	101,85	5,91	5,80%	
30	96,03	5,82	6,06%	
20	90,03	6	6,66%	
10	82,36	7,67	9,31%	
Média	95,61	6,35	6,96%	
Onda Difusiva com baixa resolução espacial (DW-30km)				
$\Delta t$	Tempo de Simulação/Intervalo de Simulação (s/s)	Redução		
		(s/s)	%	
60	29,94	-	-	
40	28,73	1,21	4,21%	
30	27,94	0,79	2,83%	
20	27,15	0,79	2,91%	
10	25,62	1,53	5,97%	
Média	27,88	1,08	3,98%	
Cascata de Reservatórios (RR)				
$\Delta t$	Tempo de Simulação/Intervalo de Simulação (s/s)	Redução		
		(s/s)	%	
60	3,04	-	-	
40	3,05	-0,01	-0,33%	
30	3,05	0	0,00%	
20	3,05	0	0,00%	
10	3,18	-0,13	-4,09%	
Média	3,07	-0,035	-1,10%	

## 12.7 Resultados da Simulação do Otimizador

O modelo hidráulico implementado para realizar as simulações foi o modelo de cascata de reservatórios do RTC-Tools. Os resultados das simulações do otimizador tem como intuito serem aplicadas em conjunto com algum sistema de previsão de chuvas. Os resultados gerados para vazão vertida e nível do reservatório em relação ao horizonte de previsão para estados possíveis futuros indicam a operação a ser feita para buscar aproveitar com o máximo de eficiência o volume de água a fim de permitir utilizar o máximo de volume no inverno e estocar o máximo de água no verão.

Foram realizadas duas simulações com horizonte de previsão de 1 ano, ou seja, com conhecimento prévio das perturbações que irão ocorrer nos 8.760 intervalos de tempo do sistema. A primeira simulação (Período de 19/01/2008 às 20:00 até 19/01/2009 às 20:00) foi denominado como cenário normal; já na segunda simulação (horizonte de previsão de 31/08/2008 às 00:00 até 31/08/2009 às 00:00), foi denominado cenário de estiagem.

Tabela 33 – Descrição dos Cenários de Otimização

	Condição Simulada	Ínicio	Fim
Cenário 1	Normal	19/01/2008 às 20:00	19/01/2009 às 20:00
Cenário 2	Estiagem	31/08/2008 às 00:00	31/08/2009 às 00:00

### 12.7.1 Cenário 1: Condição Normal

O primeiro cenário foi feito meramente com o intuito de demonstrar a eficácia do otimizador em condições normais, neste cenário os estados iniciais de volume serão idênticos aos observados. utilizou-se as mesmas condições iniciais do que as observadas.

Para avaliar os resultados do otimizador em relação ao controle de reservatório serão analisados os dados de nível do reservatório e sua vazão de saída, lembrando que existem restrições de operação conforme apresentado na Tabela 26 e 27. E para avaliar o desempenho do otimizador em relação ao controle de cheias será investigado os valores de vazão no ponto de monitoramento em Pirapora.

#### Controle do Volume do Reservatório

Os resultados para a operação otimizada do volume do reservatório estão apresentadas na Figura 54. Como podemos observar o sinal obtido foi bastante similar ao observado, o que indica que o sistema já operada consideravelmente otimizado; no entanto podemos observar que ao final do horizonte de previsão o volume simulado (em vermelho) fica ligeiramente maior do que o volume observado (em azul).

Outro resultado que é importante de ser observado é a vazão de defluência da barragem, existe uma condição de restrição ecológica, portanto deve-se evitar sempre que possível vazões menores do que  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Na figura 55a, é possível observar que os valores observados apresentam neste cenário vazões em alguns eventos muito menores do que a vazão mínima recomendável e que existem picos de vazão muito altos principalmente no final da série simulada, estes picos de vazão alta podem potencialmente causar inundações em Pirapora.

Por outro lado ao analisar e observar o sinal da figura 55b, rapidamente nota-se que a amplitude de vazão diminuiu consideravelmente ficando na faixa de 460 até  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ .

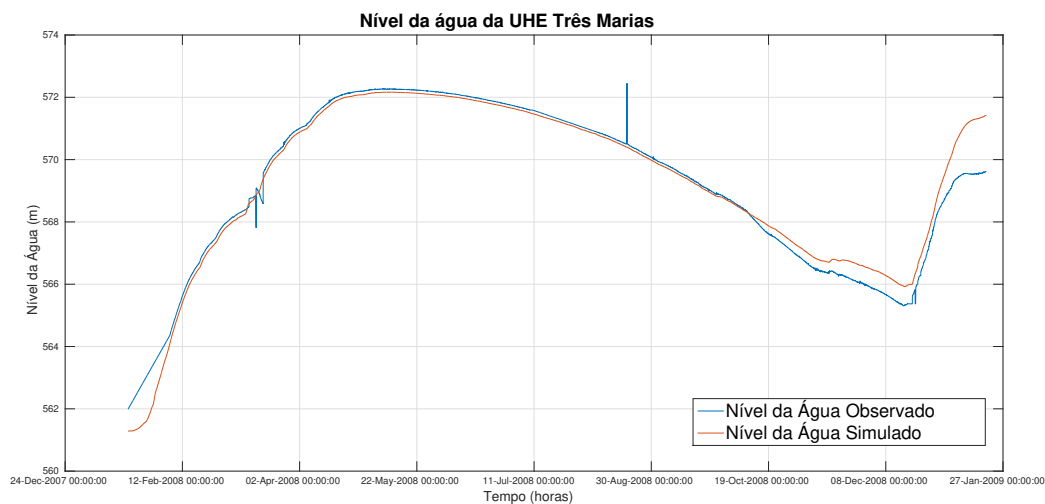


Figura 54 – Resultados dos volumes do reservatório otimizados para o Cenário 1

### Controle de Efeitos de Inundação

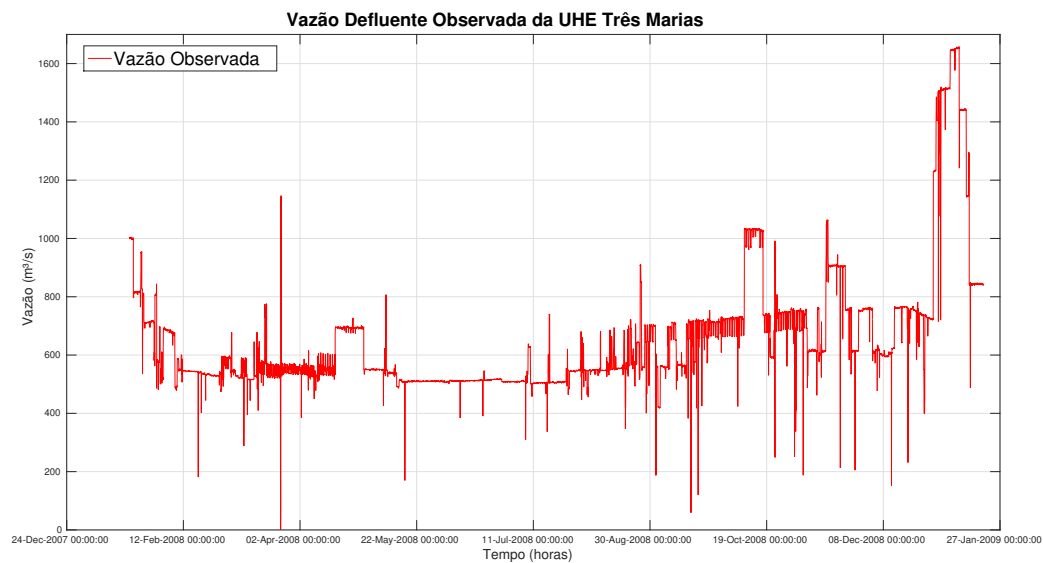
Os resultados dos valores simulados para controle dos efeitos de inundação em Pirapora, estão apresentados na Figura 56. Na figura estão plotadas as curvas no ponto de controle de inundação observadas e simuladas.

Nas vazões observadas ( Figura 56a), no final da série podemos observar vazões beirando os  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , que não chegam a ser perigosos, mas entram na faixa definida por Cavallari, Silva e Castro (2012) como início da fase de monitoramento de controle de cheia, uma vez podem representar potenciais riscos de inundação a ilhas utilizadas em culturas de subsistência. Na figura 56b, podemos observar que o otimizador consegue com sucesso atenuar estes picos, sendo que os valores máximos ficam em torno de  $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$ .

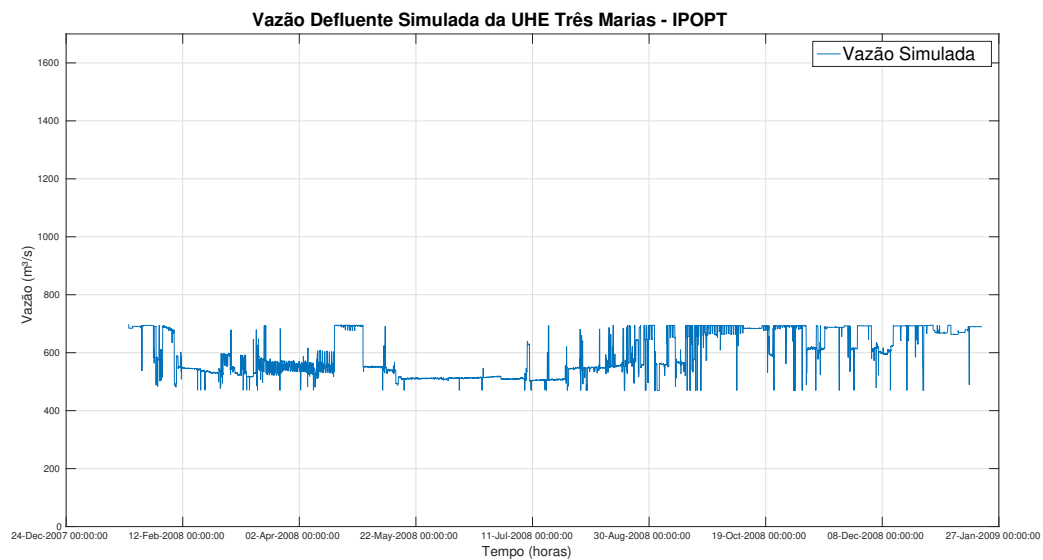
### 12.7.2 Cenário 2: Condição de Estiagem

Ao contrário do primeiro cenário, neste segundo cenário o intuito é simular uma condição de estresse hídrico, a recuperação de um reservatório para um período de estiagem, desta forma portanto os estados iniciais de volume do reservatório serão menores que o observado. Pretende-se neste cenário testar a capacidade do otimizador em conseguir recuperar volume de água e ao mesmo tempo atender as restrições operacionais.

Então de forma análoga ao cenário 1, os resultados do otimizador serão avaliados em relação ao controle de reservatório analisando os dados de nível do reservatório e sua vazão de saída, lembrando que existem restrições de operação conforme apresentado na Tabela 26 e 27. E para avaliar o desempenho do otimizador em relação ao controle de cheias será investigado os valores de vazão no ponto de monitoramento em Pirapora.



(a) Vazões Defluentes Observadas do Reservatório de Três Marias

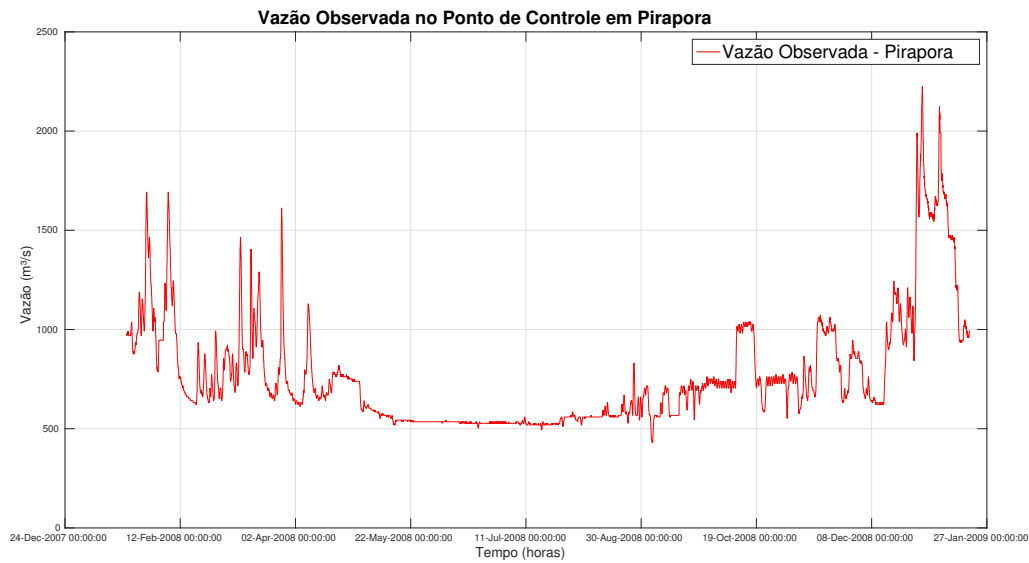


(b) Vazões Defluentes Simuladas do Reservatório de Três Marias

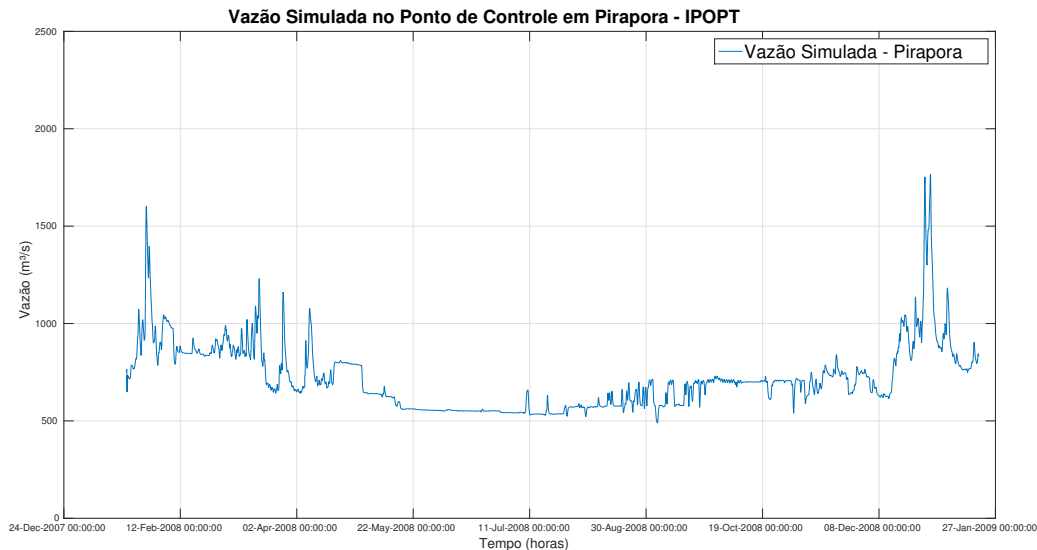
Figura 55 – Cenário 1: Comparação entre vazões defluentes simuladas e observadas do Reservatório.

### Controle do Volume do Reservatório

Como explicado anteriormente a série do otimizador começa com um volume inferior ao observado, portanto seria como se o reservatório estivesse passado por um período de estiagem onde suas reservas estão baixas e será necessário utilizar o volume disponível racionalmente para tentar recupera-lo. Na Figura 57, podemos ver sinal em azul representando os dados observados e em vermelho os dados simulados, observa-se que a linha vermelha apesar de iniciar com menos volume que a azul consegue passar pelo inverno sem entrar em nível crítico e ao final do verão consegue recuperar o volume ficando praticamente que igualado ao observado.



(a) Vazões Observadas em Pirapora



(b) Vazões Simuladas em Pirapora

Figura 56 – Cenário 1: Comparação entre vazões simuladas e observadas no ponto de controle de Pirapora.

É preciso lembrar que existem restrições operacionais na vazão de defluência da barragem, que devem ser respeitadas para uma operação ótima. A figura 58a, apresenta os valores observados para este cenário muito embora neste período de tempo não se observe descumprimento de restrição para vazões mínimas, no entanto podemos ver que existem picos grande de vazão que podem potencialmente causar inundações em Pirapora. O otimizador aproveita estes picos para recuperar o volume; a curva dos sinais observados (Figura 58b), comprova isto e assim como no cenário 1 as vazões de saída da UHE ficam restritas a uma faixa menor entre 490 e 690  $m^3/s$ .

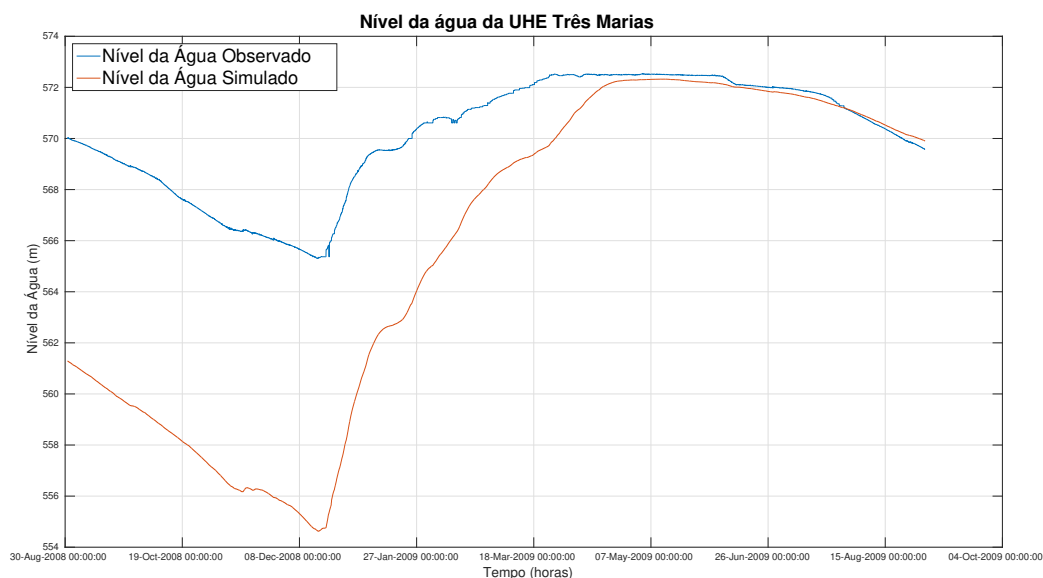


Figura 57 – Resultados dos volumes do reservatório otimizados para o Cenário 2

### Controle de Efeitos de Inundação

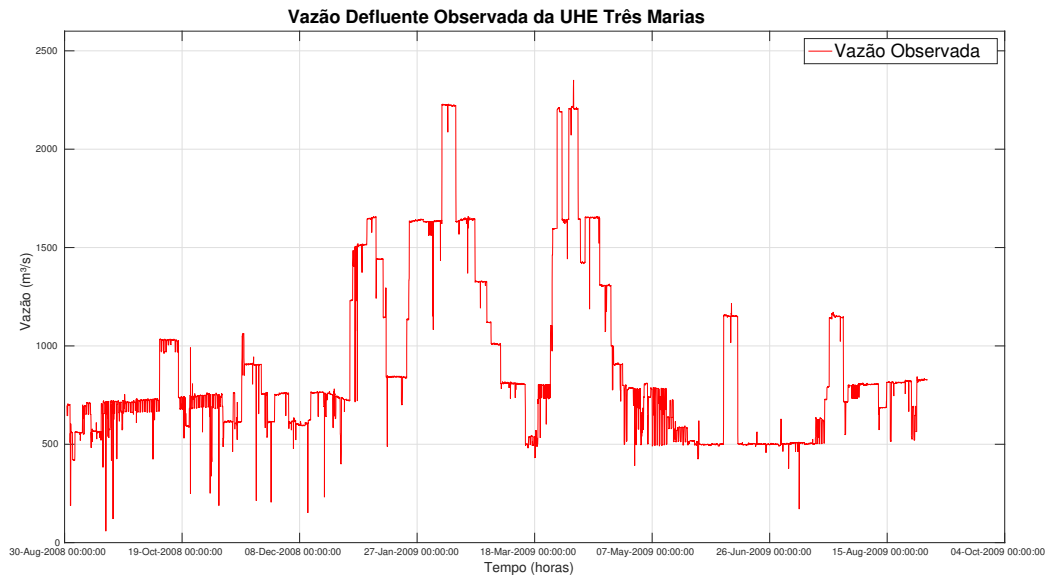
Os resultados dos valores simulados no segundo cenário para controle dos efeitos de inundação em Pirapora, estão apresentados na Figura 59. Na figura estão plotadas as curvas no ponto de controle de inundação observadas e simuladas.

Nas vazões observadas, figura 59a, no final da série podemos observar dois picos de vazão superiores a  $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , que conforme explicado anteriormente podem representar potenciais riscos de inundação a ilhas utilizadas em culturas de subsistência. Na figura 59b, podemos observar que o otimizador consegue com sucesso atenuar estes picos, sendo que os valores máximos ficam em torno de  $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$ .

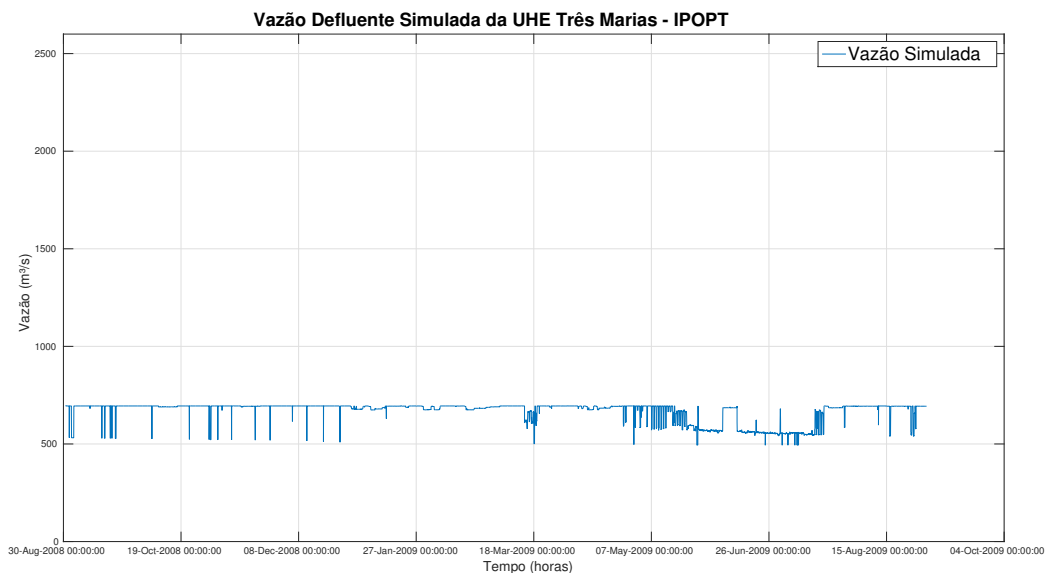
## 12.8 Avaliação dos Resultados dos Cenário de Otimização

Avaliando primeiramente os resultados na operação do volume, temos que na primeira simulação não há grande diferença na estratégia adotada pelos operadores do sistema (dados observados) e a do otimizador (dados simulados), com exceção de que ao final os dados do otimizador indicavam um nível de reservatório ligeiramente superior no final do período de simulação Figura 54. No segundo cenário, mesmo iniciando o verão com volume crítico, o otimizador acha uma solução na qual após um ano o volume reservado seria praticamente o mesmo do operador da Figura 57.

Outro dado interessante de ambas as simulações (Figura 60) conseguiram regularizaram a vazão de saída da barragem, atenuando os grandes picos de descarga e evitando as vazões de descarga mais baixas, um efeito colateral interessante de se adotar uma faixa menor de vertimento é que assim é possível evitar grandes variações nas vazões normalmente observadas decorrentes



(a) Vazões Defluentes Observadas do Reservatório de Três Marias



(b) Vazões Defluentes Simuladas do Reservatório de Três Marias

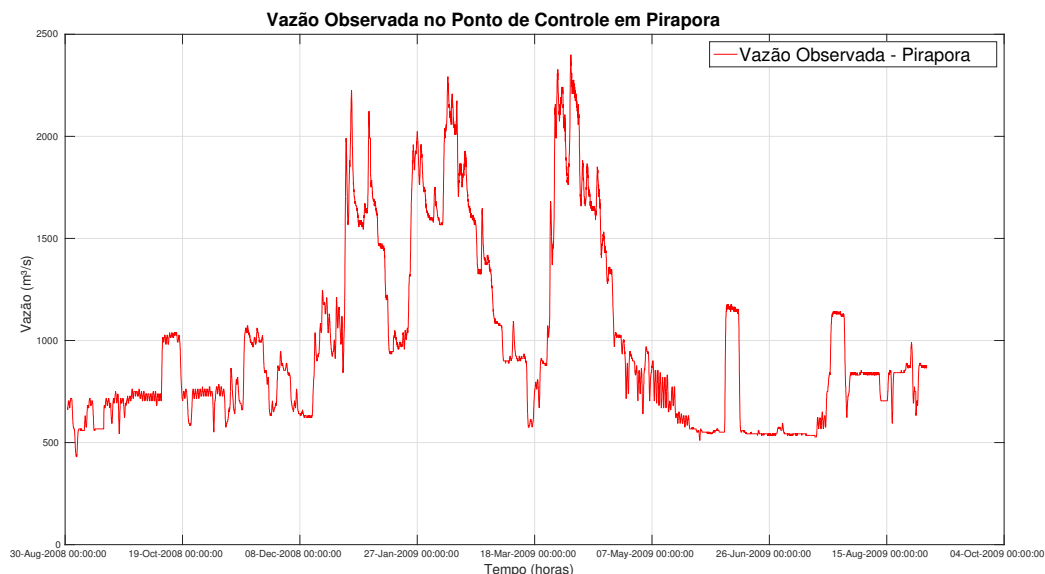
Figura 58 – Cenário 2: Comparação entre vazões defluentes simuladas e observadas do Reservatório.

da operação do reservatório, ao invés disso tanto na figura 60a, quanto na figura 60b, pode-se observar que o sinal é mais constante.

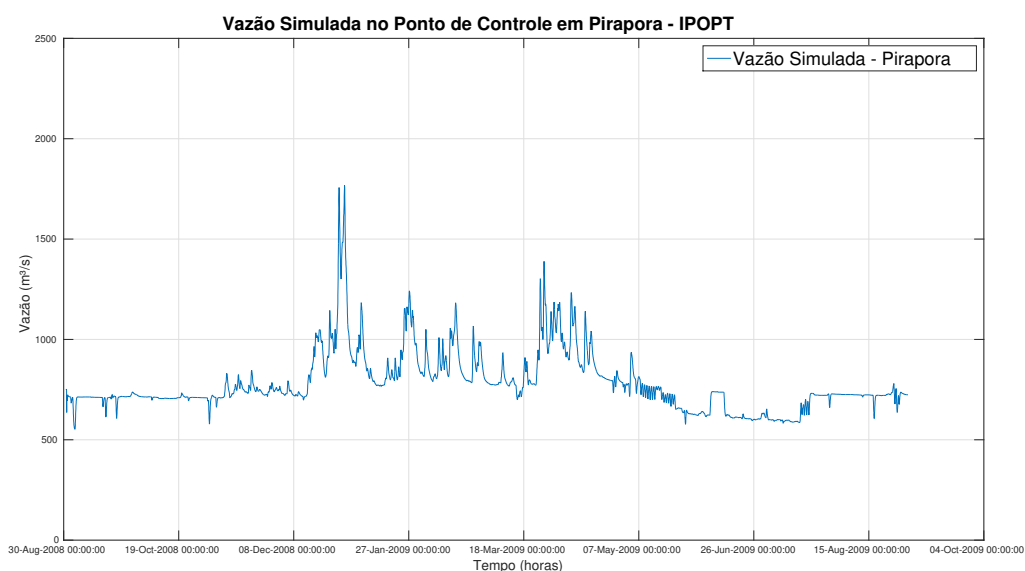
Em relação o controle de inundação em Pirapora, em ambos os cenários nos resultados simulados foi possível atenuar os grandes picos de vazão e assim prevenindo os efeitos no ponto de controle em Pirapora (Figura 61), é importante destacar que os resultados conseguiram controlar as cheias bem não descumpriram nenhuma restrição de operação.

De forma a complementar as análises gráficas, elaborou-se algumas tabelas, que concentram os dados observados e simulados para ambos os cenários (com condições iniciais iguais às





(a) Vazões Observadas em Pirapora

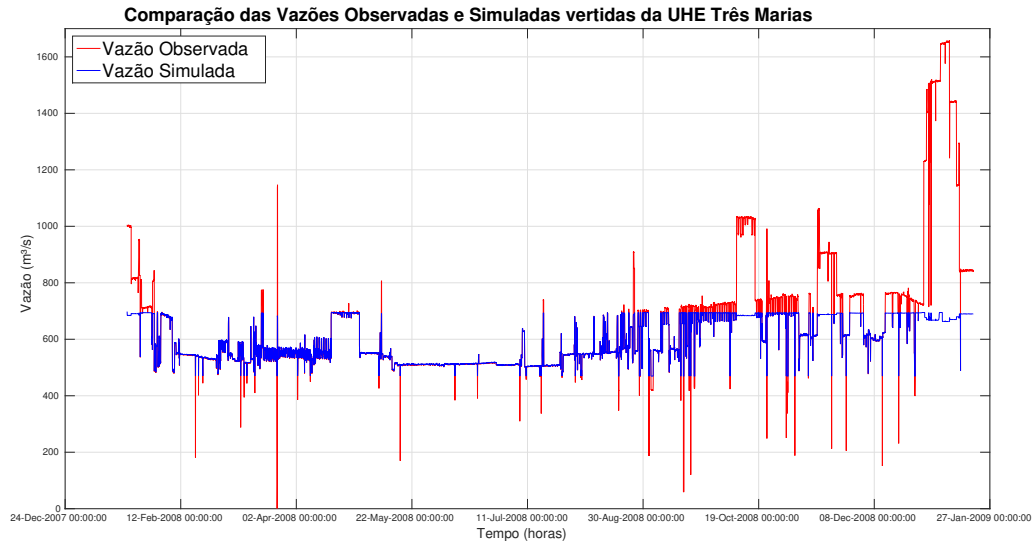


(b) Vazões Simuladas em Pirapora

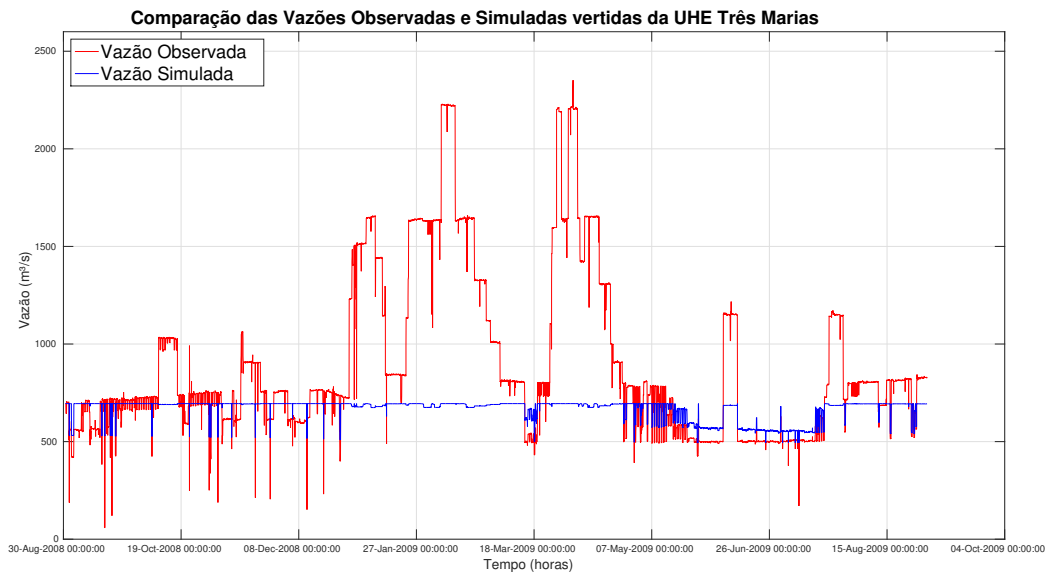
Figura 59 – Cenário 2: Comparação entre vazões simuladas e observadas no ponto de controle de Pirapora.

observadas e com condições iniciais diferentes das observadas) dos Níveis da barragem durante as simulações Tabela 34, vazões de saída da UHE Três Marias durante as simulações Tabela 35 e vazões em Pirapora Tabela 36. Nas tabelas foram calculadas a média dos valores observados e simulados, a soma dos valores totais e valores máximos e mínimos. Os valores máximos e mínimos servem para identificar o quão perto os valores ficaram dos limites e restrições de operação, já a soma é uma boa estimativa do volume de água no período avaliado.

Na Tabela 34 analisando as métricas dos níveis de água das otimizações realizadas podemos observar que muito embora os dados observados e os dados obtidos da primeira otimização serem muito parecidos, podemos observar que o otimizador tende a arriscar mais



(a) Cenário 1: Vazões Defluentes do Reservatório de Três Marias

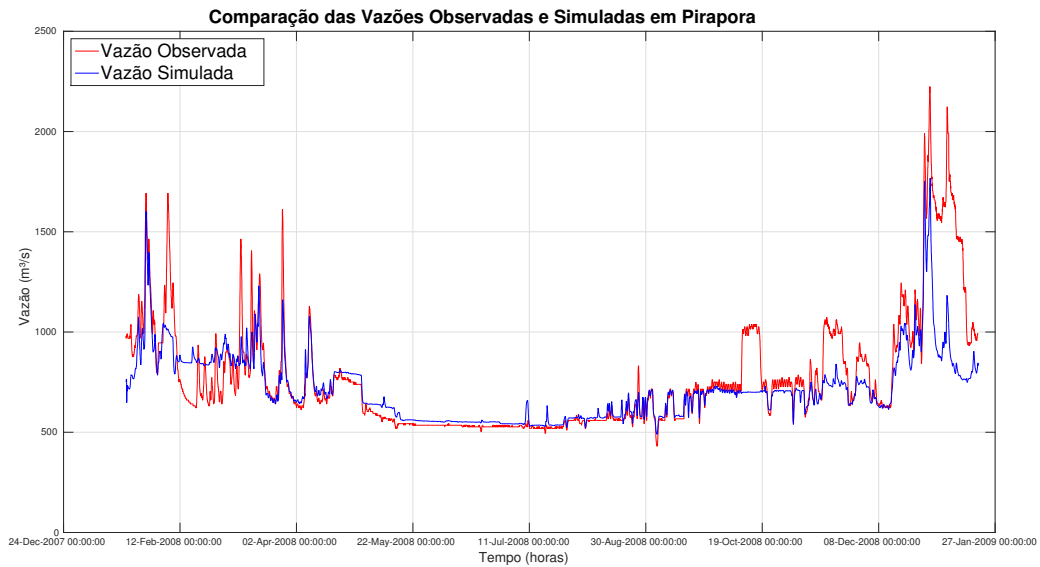


(b) Cenário 2: Vazões Defluentes do Reservatório de Três Marias

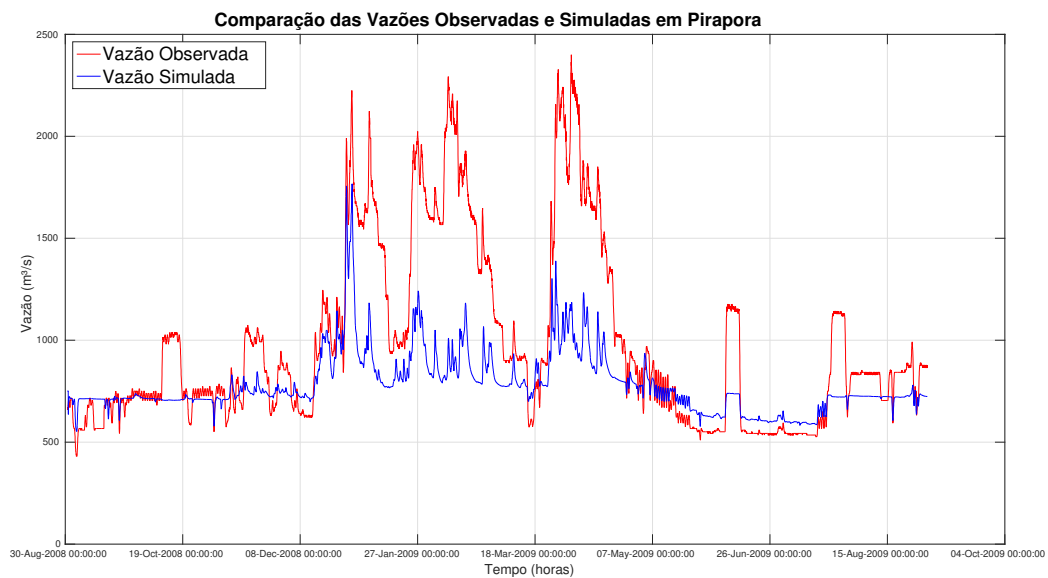
Figura 60 – Defluências do Reservatório para os Cenários de Simulação

em atingir níveis mais baixos, justamente pelo fato de ele considerar um horizonte de previsão para tomar as decisões e mais cauteloso com o nível máximo de operação, já que ele tenta evitar ao máximo passar deste nível por motivos de segurança. Já nos dados obtidos na segunda otimização que diferem bastante de comportamento, uma vez que o nível desta simulação começa propositalmente mais baixo.

As vazões de saída na barragem de Três Marias apresentadas na Tabela 35, também podem revelar bastante coisa sobre o comportamento do otimizador; tanto na primeira simulação, quanto na segunda os valores máximos são menores, mostrando que o otimizador está conseguindo atenuar o pico da propagação da onda de cheias, outro fator importante é que os valores mínimos dos dados do otimizador também são maiores do que os dados observados



(a) Cenário 1: Vazões afluentes em Pirapora



(b) Cenário 2: Vazões afluentes em Pirapora

Figura 61 – Afluências em Pirapora para os Cenários de Simulação

mostrando novamente que a modelagem está conseguindo regularizar as vazões do rio de forma mais otimizada. O último informação importante é o dado a soma da vazão vertida, o valor menor do que o observado mostra que as simulações estão conseguindo em geral reservar maior volume de água no reservatório.

A tabela com os dados de vazão no ponto da ponte de Pirapora, Tabela 36 nos mostram que tanto na primeira simulação, quanto na segunda os valores máximos são menores, o que significa otimizador está conseguindo atenuar o pico da propagação da onda de cheias mesmo no Ponto de Pirapora, outro fator importante é que os valores mínimos dos dados do otimizador também são maiores do que os dados observados mostrando novamente que a solução também está sendo eficiente no controle de cheias e regularização de vazões também em Pirapora que

Tabela 34 – Estatísticas das Otimizações com Horizonte de Previsão de 1 ano: Nível de Água da Represa.

	<b>Nível da Represa (m)</b>			
	<i>Otimização 1</i>		<i>Otimização 2</i>	
	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>
<b>Média</b>	568,952	569,214	570,134	565,615
<b>Soma</b>	4.582.905,5	4.981.759,5	4.937.255,5	4.937.255,5
<b>Mínimo</b>	561,510	561,286	565,300	554,623
<b>Máximo</b>	572,440	572,167	572,323	572,323

Tabela 35 – Estatísticas das Otimizações com Horizonte de Previsão de 1 ano: Vazão de Saída da UHE Três Marias.

	<b>Vazão Defluente (m<sup>3</sup>/s)</b>			
	<i>Otimização 1</i>		<i>Otimização 2</i>	
	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>
<b>Média</b>	654,306	597,632	987,908	781,613
<b>Soma</b>	5.725.833,5	5.2304.472,0	8.622.458,0	6.822.700,0
<b>Mínimo</b>	0,630	469,502	431,000	552,820
<b>Máximo</b>	1.658.660,0	694,737	2.400,000	1.767,215

Tabela 36 – Estatísticas das Otimizações com Horizonte de Previsão de 1 ano: Vazão no Ponto Pirapora.

	<b>Vazão Afluente (m<sup>3</sup>/s)</b>			
	<i>Otimização 1</i>		<i>Otimização 2</i>	
	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>	<b>Observado</b>	<b>Simulado</b>
<b>Média</b>	768,156	717,696	990,477	782,526
<b>Soma</b>	6.722.136,0	6.281.273,5	8.517.111,0	6.729.919,5
<b>Mínimo</b>	431,000	490,102	431,000	552,820
<b>Máximo</b>	2.225,000	1.767,220	2.400,000	1.767,215

está à jusante da represa.

## 13 Conclusão

Atualmente o cenário de expansão de energia elétrica através de geração hidroelétrica no Brasil está caminhando para uma estagnação. Há pouco potencial disponível nas grandes bacias hidroelétricas na porção austral do país enquanto que por motivos políticos e técnicos a construção de grandes empreendimentos nas bacias menos exploradas e com maior potencial como a bacia amazônica enfrentam impedimentos de ordem política e técnica.

Além disto a diminuição da demanda energética devido à diminuição do crescimento econômico do país contribuem para que não haja prioridade e necessidade em ampliar a oferta energética, ou seja construção de novas usinas.

Observa-se também uma tendência de maior integração dos centros geradores através do SIN e da ONS, tornando a operação e controle dos níveis dos reservatórios uma tarefa cada vez mais complexa.

Desta forma urge a necessidade de ferramentas eficientes que permitem aos operadores e tomadores de decisão operar de forma otimizada os reservatórios existentes, portanto a ferramenta proposta apresenta claras melhorias e contribuições operacionais, permitindo obtenção de soluções rápidas e confiáveis para situações críticas como controle de cheias ou mesmo períodos de estiagem.

Esta comparação dos modelos selecionados servirá para criar uma biblioteca de modelos com diferentes modelos de roteamento disponíveis para fazer uma seleção do mais apropriado dentro de um controlador preditivo para a previsão operacional e para o SSD da CEMIG.

No Apêndice H na Tabela 131, estão apresentados os resultados das análises de desempenho estatístico e computacional dos modelos analisados. Nesta tabela podemos ver que há uma tendência de aumento do tempo de processamento conforme a complexidade dos modelo conceitual e número de nós de cálculo aumenta. Isto pode ser explicado devido ao fato de que ao passo que se negligenciam termos da equação de conservação de quantidade de movimento, ou seja mais simplificações são adotadas, menos processamento é necessário para solucionar as ESV e também devido ao fato de que ao aumentarmos a resolução temporal aumenta-se o número de etapas de processamento.

Desta forma o SOBEK, que utiliza o modelo totalmente hidrodinâmico das ESV, foi o modelo que necessitou mais tempo para realizar a simulações; em seguida seguidos dos modelos de onda difusiva, que são uma simplificação do modelo totalmente dinâmico; os modelos mais

simples que são baseados em alocação de volume (cascata de reservatórios e o MBG-IPH) foram portanto os modelos que necessitaram de menos processamento.

Em relação aos resultados, as duas configurações do modelo de onda difusa (baixa e alta resolução espacial) sofreram com efeitos de amortecimento dos picos. Estes efeitos podem ser notados na Figura 41, onde são comparados as duas configurações de onda difusa com o o SOBEK. Apesar de utilizarem uma equações governantes simplificadas em relação aos outros modelos, tanto o RTC-Tools com Cascata de Reservatórios quanto o MGB, não apresentaram difusão numérica; o outro modelo que também não apresentou este comportamento foi modelo totalmente hidrodinâmico (SOBEK) (Figura 47).

Embora não apresente a atenuação dos picos presente nos modelos de onda difusiva, no geral os resultados do MGB foram os piores dentre os modelos, justamente por causa da dessincronização e defasagem entre os sinais simulados e observados e devido à exageros na estimativa da contribuição dos tributários no Rio São Francisco, que levando-se em consideração o aspecto operacional de reservatórios é prejudicial, pois pode colocar em risco todas as restrições operacionais, devido à esta defasagem entre os picos simulados e os observados, que pode resultar por exemplo em decisões precipitadas ou atrasadas.

Apesar da difusão já discutida acima os modelos de onda difusa, tanto o de resolução espacial mais detalhada, quanto o de resolução espacial menos detalhada, apresentaram bons índices de desempenho estatísticos. Porém observa-se uma incapacidade desta configuração em reproduzir a magnitude dos grandes picos de vazão, o que é uma característica indesejável pois para operação de reservatórios isto poderá significar que o modelo poderá subestimar picos da propagação de cheia, que pode significar em caso de um evento severo de inundação, riscos de violação das restrições operacionais do reservatório.

Em relação aos impactos resultantes do aumento da resolução espacial e temporal nos modelos de onda difusa; é importante ressaltar que apesar de haver pequena melhora nos resultados, os esforço computacional aumentou significativamente. Os refinamentos espaciais produziram maiores impactos nos resultados do que os refinamentos temporais. Porém estas melhorias não foram satisfatórias o suficiente para compensar o aumento de tempo de processamento resultante do aumento da complexidade resultante dos refinamentos nas resoluções espaciais e temporais.

Usando baixa resolução espacial, o modelo de onda difusa apresentou desempenho de processamento relativamente satisfatório, porém há excesso de difusão numérica em seus resultados e os refinamentos espaciais e temporais ao custo de esforço computacional, não foram capazes de melhorar substancialmente os resultados para corrigir a difusão.

O SOBEK, que é modelo mais complexo dentre os selecionados, em geral apresentou

bons resultados com os indicadores, mas apesar disto, o alto custo computacional e ausência de um modelo adjunto, torna sua integração proibitiva para aplicação em um otimizador de controle de operação em tempo real.

O SPRNT se mostrou extremamente instável, não sendo possível configurar uma versão que pudesse simular períodos maiores do que 3 meses sem interrupção, assim sendo para avaliá-lo com o SOBEK, foi escolhido o maior período no qual o SPRNT conseguiu ser executado. O modelo apesar de ser mais rápido para realizar as simulações que o seu similar (SOBEK), não aparenta conseguir reproduzir os picos de vazão no exutório (Pirapora), isto pode ser causado em parte porque não foi possível implementar nesta configuração as vazões laterais calculadas pelo MGB.

Ao incorporar as vazões laterais do MGB ao SPRNT, o mesmo se torna instável, resultando em interrupção das simulações por não ser capaz de convergir os resultados. Um dos motivos para esta instabilidade pode estar relacionado às condições de contorno do modelo de saída do modelo, que são níveis de água, para este estudo de caso elas foram obtidas indiretamente através de uma curva cota-vazão providenciada pela CEMIG (Figura 37).

Outra questão importante para a implementação do SPRNT como uma ferramenta para operação de barragens está na arquitetura de *software*, será necessário uma substancial mudança no código-fonte para facilitar o gerenciamento do banco de dados, visto que atualmente a configuração e a entrada de dados é feita através de um único arquivo texto. A saída de dados também é complicada, sendo necessário uso de softwares como SciLab ou Matlab para extração e visualização dos dados. Além disto o programa atualmente não compila em FORTRAN ou em plataforma Windows, sendo restrito para uso em distribuições Linux ou Mac OS através do uso de *Mavericks*.

O modelo de cascata de reservatórios (RR), que é o mais simplificado dentre os selecionados, obteve resultados similares aos do SOBEK com menos esforço computacional e ao contrário dos modelos de onda difusiva, apresentou resultados marginalmente piores com maiores resoluções temporais e não sofreu com difusão numérica dos mesmos. A defasagem temporal foi corrigida através da contribuição de Schuurmans, Bosgra e Brouwer (1995), que foi explicada na seção 8.2. Este modelo simples pode fornecer uma precisão suficiente para a gestão de curto prazo.

Em relação ao problema de otimização mesmo utilizando o modelo mais simplificado RR e considerando o problema do estudo de caso de maneira bastante simplificada, foi possível tanto controlar a operação mantendo os níveis e vazões operacionais quanto mitigar efeitos de inundação no ponto de controle.

Um ponto positivo é que utilizou-se uma plataforma que representa o estado-da-arte na integração de banco de dados e modelos de diferentes naturezas, um dos modelos não foi integrado por questões técnicas, mas com uma biblioteca de modelos com diferentes configurações e preparado para processos de aquisição de dados e para incorporação de diferentes soluções para NWP.

### 13.1 *Trade-off* entre Precisão e Desempenho Computacional

Para a aplicação do estudo de caso deste trabalho, é de vital importância que o SSD proposto produza simulações confiáveis e rápida. Estas simulações hidráulicas no trecho entre a UHE Três Marias e o ponto de controle de inundação localizado cerca de 130 km a jusante da barragem no município de Pirapora, devem ser confiáveis para poderem ser usadas no controle de cheias e ao mesmo tempo rápidas uma vez que se propõe uma aplicação para controle em tempo real.

Considerando que estas soluções são obtidas através um problema de otimização e portanto que ocorram simulações iterativas, além do fato de que o SSD opera *online*, ou seja através de métodos de aquisição de dados em tempo real, novos inputs são introduzidos para atualizar os estados então urge configurar os modelo para que reproduzam resultados confiáveis e que ao mesmo tempo não exijam muito esforço computacional.

Portanto busca-se dentre os modelos testados aquele que apresente as duas características; precisão e rapidez. No entanto existe um ajuste entre maior precisão e maior esforço computacional. Conforme a complexidade do modelo ou da configuração mais processamento computacional é necessário para obter os resultados.

Considerando somente o esforço computacional e o tempo de processamento, conforme já apresentado no Apêndice H, os resultados obtidos indicam que o modelo mais rápido foi indiscutivelmente a configuração do RTC-Tools usando Cascata de Reservatórios que precisou de 249 ms em sua resolução temporal horária para simular o período de 15/01/2007 até 20/06/2011; seguido do modelo MGB-IPH, que precisou de 345 ms para simular o mesmo período; em seguida as configurações de onda difusa do RTC-Tools que necessitaram de 2.449 e 8.814 ms, respectivamente baixa e alta resolução espacial, para simular o período; o modelo SOBEK totalmente dinâmico foi o que apresentou o custo de CPU mais elevado, sendo necessários 51.090 ms para realizar a simulação do período.

Já analisando o desempenho dos modelos quanto a precisão dos seus resultados, através de indicadores de desempenho, observa-se que: no caso dos modelo que utilizam a simplificação da onda difusiva, o modelo com maior detalhamento espacial, o de resolução espacial refinada, apresentou indicadores um pouco melhores do que o que utiliza a baixa resolução espacial; e



que o aumento da resolução temporal em ambas as resoluções espaciais resultaram apenas em melhoras marginais nos indicadores.

Observa-se então que existe um *trade-off* entre precisão e custo computacional, ou seja para obter maior precisão nos resultados é necessário maior esforço computacional o que significa que é necessário abdicar um pouco de precisão por conta das simplificações para gerar resultados mais rapidamente. Esta tendência é mais clara quando compara-se o desempenho computacional e indicadores entre os modelos de onda difusa; ao refinar a resolução espacial obtém-se melhores resultados a um maior esforço computacional que está representado pelo tempo em ms para realizar as simulações.

Essa troca entre custo computacional e precisão também é observada no custo relativo de processamento, ou seja quanto e o esforço computacional necessário para simular uma etapa temporal de simulação. Na Figura 62 mostra nitidamente que conforme os modelos se tornam mais simplificados a eficiência aumenta, ou seja o tempo necessário para simular uma etapa de simulação diminui. Curiosamente para os modelos de onda difusiva, há uma pequena tendência inversa para os refinamentos temporais, ao passo que a escala temporal é refinada menor o custo ou esforço.

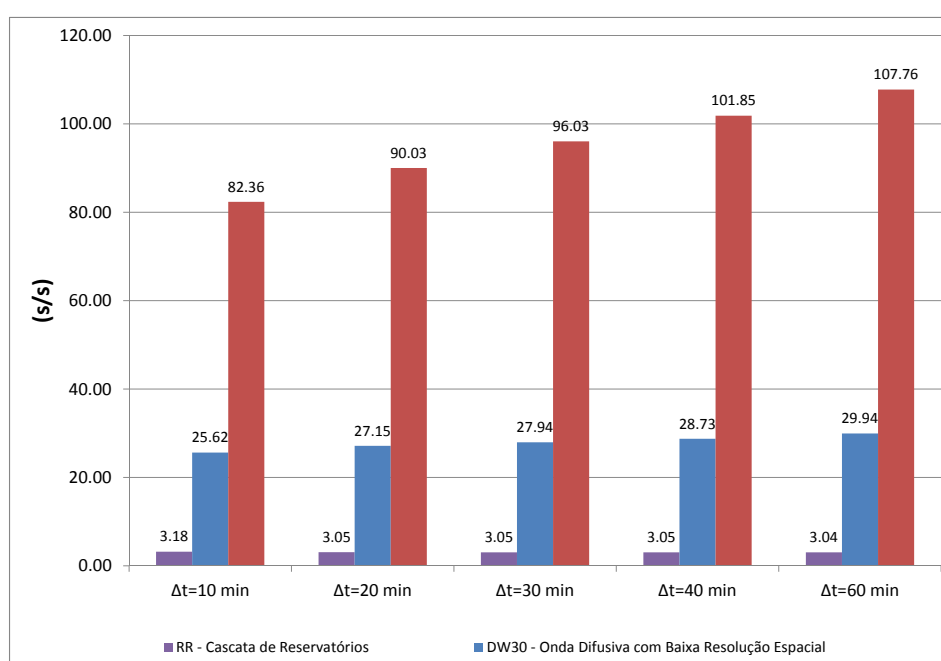


Figura 62 – Tempo de Processamento por numero de intervalos de tempo de simulação para os modelos de Onda Cinemática (RR) e Onda Difusiva (DW).

Sendo que a taxa em que este custo relativo diminui é maior para o modelo mais complexo

e detalhado (DW-10km) do para a do modelo mais simplificado (DW-30km); diminuindo em média 6,96% para o modelo de alta resolução espacial e em média de 3,98% no modelo de baixa resolução espacial (Tabela 32). Já nos modelos de Cascata de Reservatórios observa-se uma tendência inversa a observada nos modelos de onda difusiva, nos modelos de alocação de volume, conforme a escala temporal é refinada, o custo relativo aumenta ligeiramente, em média de 1,10%.

Deste modo ao adotar um modelo mais complexo em geral obtêm-se resultados mais precisos, mas é necessário maior capacidade de processamento, o que pode se tornar um problema quando este modelo está aplicado em um MPC. Apesar do SOBEK apresentar bons resultados, seu alto custo computacional desqualifica ele como melhor candidato para integração com o otimizador; de maneira inversa o modelo de onda difusiva com baixa resolução espacial apesar de apresentar desempenho de processamento relativamente bom, sofre de excesso de difusão numérica que pode gerar imprecisões ao simular picos e variações rápidas de vazão tornando-o inapropriado para ser usado como balizador das operações de reservatórios e controle de inundações.

Para o estudo de caso deste estudo, onde não há aparentemente efeitos de remanso, o modelo de Cascata de Reservatórios apresentou resultados semelhantes com o modelo mais complexo SOBEK, usando significativamente menos tempo de processamento computacional.

Esta abordagem de alocamento de volumes com introdução de advecção pura por deslocamentos temporais, do modelo Cascata de Reservatórios com integrador de atraso (RR), permite um ajuste fino do propagação do fluxo usando da integração dos deslocamentos temporais e reservatórios não-lineares permitem. Esta é uma solução eficiente para a difusão numérica excessiva, mesmo em casos de baixa resolução espacial. Do ponto de vista do controle preditivo, esta abordagem mostra o melhor compromisso em termos de robustez, eficiência e precisão dos resultados.

## Aplicabilidade para Operação de Reservatórios

É importante destacar que os dados observados utilizados nas simulações são resultado dos despachos e vazões determinados pela otimização global feita pelo ONS através de seu modelo o NEWAVE, que otimiza as UHE globalmente, no âmbito do SIN, já que o objetivo é manter o suprimento de energia no país como um todos otimizado.

Na situação atual a aplicabilidade do sistema proposto está limitado às situações operacionais descritas no Apêndice A, nas quais o ONS, transfere a decisão de operação ao agente gerador; que são situações de emergência para controle e atenuação de cheias.

No entanto justamente esta falta de liberdade do operador de tomar algumas decisões

localmente podem resultar eventualmente em operação sub-ótima dos reservatórios. Deve-se ressaltar também que os resultados aqui apresentados não são as soluções ótimas do sistema, mas sim soluções verossímeis e que é muito difícil conciliar as restrições operacionais, demandas de geração enérgicas com controle de cheias e otimização de volume existentes na realidade.

É de suma importância e utilidade para operação de reservatórios de reservação para gerenciamento de recursos hídricos integrados, atender os diversos usos da água evitando conflitos ou prejuízos financeiros, materiais e pessoais para os *stakeholders*, portanto neste âmbito esta ferramenta computacional atende as demandas dos operadores e tomadores de decisão, uma vez que permite mensurar melhor os riscos das ações a serem tomadas e suas consequências a jusante dando suporte aos operadores do sistemas, fornecendo informações críticas de forma precisa e rápida.

Através da análise dos gráficos e estatísticas resultantes de ambos os cenários de simulação, é notável a utilidade da ferramenta, visto que a técnica soluciona eficientemente os problemas de controle de cheias visto, já que as vazões de saída da barragem e à jusante da barragem no ponto de controle em Pirapora indicam claramente atenuação dos picos de vazão.

Na Tabela 32 apresentada na seção 12.5, os valores máximos, mínimos e médios, indicam que houve uma normalização da vazão afluente da barragem, a faixa de operação de vazão é menor se comparada com os valores anteriormente observados, indicando que as soluções evitaram ao máximo violar as condições de restrição do local, preferindo ao máximo operar numa faixa mais estreita de valores, que como consequência evitam grandes oscilações nas vazões de descarga, o que a torna mais constante e portanto normalizada.

Além disto, conforme pode ser observado nas Figura 54 e Figura 57, os gráficos mostram uma operação mais arrojada nas otimizações; devido ao conhecimento prévio das condições meteorológicas futuras, foi possível verter a água em situações críticas para alocar o volume de espera e ao final do período manter o mesmo volume no caso do primeiro cenário ou recuperar o volume de água no segundo cenário.

Então temos que foi possível através do uso do MPC, obter soluções para o controle dos reservatórios em que não só possibilitaram evitar violações das restrições operacionais e ambientais, como atenuar dos picos de vazão e otimizar tanto o volume dos reservatórios quanto os volumes vertidos da represa.

Deve-se salientar também que a total potencialidade da ferramenta proposta depende da aplicação *ensembles* confiáveis para geração dos horizontes de previsão futuros juntamente com técnicas de aquisição de dados em tempo real no MPC.

O grande grau de incertezas inerentes existentes na previsões meteorológicas disponíveis,

principalmente nas que utilizam métodos determinísticos, implicam em resultados de otimização subotimizados ou não otimizados. Pois a qualidade das otimizações depende de horizontes de previsão futuro confiáveis, ou seja os cenários futuros de otimização são tão bons e confiáveis quanto os *ensembles* utilizados. Utilizando aquisição de dados em tempo real seria possível melhorar a qualidade das previsões e conseqüentemente dos resultados da otimização.

Por isso da importância do desenvolvimento de métodos, técnicas e ferramentas que permitam o gerenciamento integrado de cenários para diferentes contribuições de vazão e carga utilizando técnicas de otimização estocásticas e determinísticas, sistema de gestão conjunta para a produção de energia hidroelétrica e comercialização sobre diversas restrições: duras ou suaves, assim possibilitando visualização dos resultados para o suporte à decisão.

A utilização dos recursos de integração de modelos e banco de dados, facilitou a integração dos modelos, banco de dados e otimizador, permitindo importar e exportar dados, processar e transformar dados, simular, integrar modelos com o otimizador e retroalimentar resultados entre os modelos para fazer as iterações e avaliações necessárias para as situações propostas.

Estas novas tecnologias como *OpenMI* e *OpenDA* se destacam pois sem elas todos os processos relativos aos banco de dados como aquisição, armazenamento, correção, filtragem, importação e exportação não ocorreriam de forma rápida, eficaz e automatizada. Além disto o Delft-FEWS e *OpenMI*, permitiram integração rápida de modelos diferentes, permitindo comunicação entre eles, de forma que fosse possível unificar os dados de entrada e retroalimentar os modelos, ou seja utilizar os resultados de simulações como entrada de dados em outras simulações para melhorar Os resultados.

Isto permite flexibilidade ao modelador para criar soluções e configurações sob medida para diferentes problemas; a escolha de modelos e dados não é tão engessada permitindo criar configurações ou combinações de modelos para buscar soluções para o problema proposto.

Recentemente com o progresso no campo da computação sendo que os métodos de processamento evoluíram possibilitando utilizar técnicas e métodos de simulação mais complexos que não eram possíveis de utilização prática no passado. A nova onda computacional a quinta onda computacional será voltada na rápida disponibilidade e compartilhamento de dados via tecnologias como *Cloud Computing* e Internet das Coisas, o que implicará que num futuro próximo o armazenamento e manipulação de dados ser tornarão cada vez mais importantes.

## 13.2 Sugestões para futuras pesquisas

O modelo proposto aplicado para a otimização de operação de barragens para controle de cheias, permitem integrar de maneira eficiente modelos com um otimizador para serem

executados de forma conjunta gerando de maneira rápida previsões de níveis e vazões de descarga para uma hidrelétrica baseados em previsões futuras das condições meteorológicas. Contudo para garantir a precisão dos resultados conforme dito anteriormente há necessidade de melhorar os modelos de previsão meteorológica estocástica, refinando os modelos existentes para diferentes locais no território brasileiro.

Há também necessidade de melhorar a a precisão dos resultados de alguns modelos, como no caso do SPRNT, para tanto seria interessante conseguir através de uma bacia hidrográfica totalmente instrumentada testar técnicas de aquisição de dados em tempo real.

Como sugestão para aprofundar a discussão em futuras pesquisas, o autor elenca alguns tópicos que poderão representar avanços no conhecimento científico e técnico em relação ao gerenciamento de recurso hídricos focados na operação em tempo real de reservatórios:

- a) Integração do SSD proposto com previsão meteorológica estocástica (*Ensembles*). Investigar a aplicação deles e impactos deles na operação em tempo real dos reservatórios;
- b) Aperfeiçoar os modelos e as restrições do otimizador para permitir também, avaliar se existem soluções otimizando não só o volume, mas também a geração elétrica;
- c) Avaliar o impacto deste tipo de otimização de operação globalmente, ou seja se aplicando este tipo solução local seria possível obter melhorias para o atual sistema de otimização global do *NEWAVE*;
- d) Avaliar se há benefícios em relação aos impactos ambientais relacionados às barragens e sistemas lânticos: Assoreamento, estratificação do reservatório, impactos à jusante, etc.
- e) Avaliar como esta técnica funcionaria em represas em cascata, se haveria um ganho global otimizando-as desta forma;
- f) Avaliar a aplicabilidade dos modelos desenvolvidos utilizando previsão de tempo estocástica para prever, programar e eventualmente executar *flushing* de sedimentos na época de chuva;



## Referências

AACI/FURB. *Desastre de 2008 no Vale do Itajaí. água, gente e política*. Blumenau: FURB, 2009. Citado na página 38.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *MANUAL DE ESTUDOS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS - Manual do Usuário*. [S.l.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

ALDRIGHETTI, E. *Computational Hydraulic Techniques for the Saint-Venant Equations in arbitrarily shaped geometry*. Tese (PhD Thesis) — Università Degli Studi di Trento, May 2007. Citado na página 94.

AMARAL, F. C. S. *Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais: Avaliação e Adequação*. Dissertação (Dissertação( Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)) — ESALQ-USP, Piracicaba, SP, 1993. Citado na página 169.

ANDERSON, J. D. *Computacional Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 93.

ANDERSON, R. M.; KOREN, V. I.; REED, S. M. Using ssurgo data to improve sacramento model a priori parameter estimates. *Journal of Hydrology*, v. 320, n. 1-2, p. 103–116, March 2006. Citado na página 71.

ARGENT, R. M. et al. A new approach to water quality modelling and environmental decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, v. 24, n. 7, p. 809–818, July 2009. Citado na página 151.

ARULAMPALAM, M. S. et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 50, n. 2, p. 174–188, February 2002. Citado na página 128.

ASSELMAN, N. E. M.; HEYNERT, K. Consequences of floods: 2d hydraulic simulations for the case study area central holland. In: *Delft-Cluster Publication*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 22p. Citado 3 vezes nas páginas 73, 74 e 139.

AWWAD, H. M.; JUAN; RESTREPO, P. J. Streamflow forecasting for han river basin, korea read more: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(asce\)0733-9496\(1994\)120Journal of Water Resources Planning and Management](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(asce)0733-9496(1994)120Journal of Water Resources Planning and Management), v. 120, n. 5, p. 651–673, September 1994. Citado na página 126.

AWWAD, H. M.; VALDÉS, J. B. Adaptive parameter estimation for multisite hydrologic forecasting read more: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1992\)118Journal of Hydraulic Engineering](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(asce)0733-9429(1992)118Journal of Hydraulic Engineering), v. 118, n. 9, p. 1202–1221, September 1992. Citado na página 126.

BARKER, G. *Farming the Desert: Synthesis*. Paris, France: UNESCO Publishing, 1996. Citado na página 34.

BATES, P. D.; HORRIT, M. S.; FEWTRELL, T. J. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, v. 387, p. 33–45, 2010. Citado na página 99.

- BAYSAL, F. M. *Improving efficiency and effectiveness of Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models*. Tese (Doutorado) — University of Arizona, 2003. Citado na página 127.
- BECK, H. E. et al. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, v. 52, n. 5, p. 3599–3622, May 2016. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- BERGSTRÖM, S. Computer models of watershed hydrology. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Water Resources Publications, LLC, 1995. cap. The HBV Model. Citado na página 70.
- BERGSTRÖM, S.; FORSMAN, A. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. *Hydrology Research*, v. 4, n. 3, p. 147–170, June 1973. Citado na página 70.
- BEVEN, K. *Rainfall-Runoff Modelling: The primer*. 2nd edition. ed. [S.l.]: Willey-Blackwell, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 68.
- BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, v. 6, n. 3, p. 279–298, 1992. Citado na página 125.
- BISWAS, A. K. Integrated water resources management: Is it working? *Water Resources Development*, v. 24, n. 1, p. 5–22, March 2008. Citado na página 35.
- BLANCO, T. B. et al. Flood regulation using nonlinear model predictive control. *Control Engineering Practice*, v. 18, p. 1147–1157, 2010. Citado na página 104.
- BLIND, M.; GREGERSEN, J. B. Towards an open modelling interface (openmi) the harmonit project. *Advances in Geosciences*, v. 4, p. 69–75, 2005. Citado na página 83.
- BOUGEAULT, P. et al. The thorpex interactive grand global ensemble. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 91, n. 8, p. 1059–1072, Agosto 2010. Citado na página 121.
- BRAGA, B.; BARBOSA, P. S. F.; NAKAYAMA, P. T. Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 3, p. 73–95, Jul/Set 1998. Citado na página 83.
- BRAS, R. L.; RESTREPO-POSADA, P. Real time automatic parameter calibration in conceptual runoff forecasting models. In: *3rd International Symposium on Stochastic Hydraulics*. [S.l.: s.n.], 1980. p. 61–70. Citado na página 126.
- BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. *Random Functions and Hydrology*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1985. Citado na página 126.
- BUIZZA, R. et al. The new ecmwf vareps (variable resolution ensemble prediction system). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 133, n. 624, p. 681 – 695, 2007. Citado na página 121.
- BUIZZA, R. et al. A comparison of the ecmwf, msc, and ncep global ensemble prediction systems. *Monthly Weather Review*, v. 133, p. 1076–1097, 2005. Citado na página 121.
- BURNASH, R. J. C. Computer models of watershed hydrology. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: Water Resources Publications, LLC, 1995. cap. The NWS river forecast system - cathcment modeling. Citado na página 70.



- BURNASH, R. J. C.; FERRAL, R. L.; MCGUIRE, R. A. *A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modeling for Digital Computers*. [S.l.]: U.S. Department of Commerce, National Weather Service, and State of California, Department of Water Resources, 1973. Citado na página 70.
- BUTZER, K. et al. Irrigation agrosystems in eastern spain: Roman or islamic origins? *Annals of the Association of American Geographers*, v. 75, p. 479–509, 1985. Citado na página 34.
- CAÑIZARES, R. et al. Developments in operational shelf sea modelling in danish waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 53, n. 4, p. 595–605, October 2001. Citado na página 127.
- CARVALHO, N. de O. et al. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica / Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- CAVALLARI, A.; SILVA, A. P. da; CASTRO, H. S. de. *Manual de Procedimentos da Operação*. [S.l.], 2012. Citado 3 vezes nas páginas 159, 160 e 202.
- CCCE-ONS. *Treinamento NEWAVE-DECOMP*. [S.l.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.
- CHANSON, H. *The hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction - Basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures*. [S.l.]: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. Citado na página 143.
- CHAPUIS, J. *Modellierung und neues Konzept für die Regelung von Laufwasserkraftwerken*. Tese (Diss. Techn. Wiss. Nr 12765) — ETH Zürich, 1998. Citado na página 112.
- CHIANG, P. K.; WILEMS, P.; BERLAMONT, J. A conceptual river model to support real-time flood control (demer river, belgium). In: DITTRICH et al. (Ed.). *River Flow 2010: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*. Braunschweig, Germany: Bundesanstalt für Wasserbau, 2010. p. 1407–1414. Citado na página 112.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 89 e 99.
- CLEMMENS, A. J. et al. Estimating canal pool resonance with auto tune variation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 138, n. 1, p. 9–15, January 2012. Citado na página 112.
- COLLISCHONN, W. et al. The mgb-iph model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences hydrologiques*, p. 878–895, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 72 e 142.
- COLLISCHONN, W. et al. *Modelo de Grande Bacias-IPH: Manual de Discretização de Bacias para Aplicação do modelo MGB-IPH*. Versão 2.0. Porto Alegre, RS, 2010. Citado na página 168.
- CRISPINO, G.; GISONNI, C.; IERVOLINO, M. Flood hazard assessment: comparison of 1d and 2d hydraulic models. *International Journal of River Basin Management*, v. 13, n. 2, p. 153–166, June 2014. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

DELGODA, D. K.; N.HALGAMUGE, S. K. S. M.; MALANO, H. Multiple model predictive flood control in regulated river systems with uncertain inflows. *Water Resources Management*, v. 27, p. 765–790, 2013. Citado na página 104.

DELTAIRES. *DELFT-FEWS Documentation*. 22. ed. <http://publicwiki.deltaires.nl/display/FEWSDOC/Home>, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 145, 152, 154 e 155.

DELTAIRES. *SOBEK - Hydrodynamics, Rainfall, Runoff and Real Time Control*. [S.l.], 2014. Citado 4 vezes nas páginas 73, 74, 135 e 136.

DENZER, R. Generic integration of environmental decision support systems – state-of-the-art. *Environmental Modelling and Software*, v. 20, n. 10, p. 1217–1223, October 2005. Citado na página 78.

DERMODY, B. J. et al. A virtual water network of the roman world. *Hydrology and Earth Sciences*, v. 18, p. 5025–5040, November 2014. Citado na página 34.

DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 1001–1007, 2015. Citado na página 70.

DING, Y.; WANG, S. Optimal control of open-channel flow using adjoint sensitivity analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 132, n. 11, p. 1215–1228, November 2006. Citado na página 112.

DUREN, F. K.; BEARD, L. R. *Optimizing Flood Control Allocation for a Multipurpose Reservoir*. Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC) 609 Second Street Davis, CA 95616-468, 1972. Citado na página 40.

ECWMF. *User guide to ECMWF forecast products*. Version 1.2. [S.l.], 2015. Citado 5 vezes nas páginas 115, 116, 117, 121 e 122.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIAS. *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional - 2016 (Ano base 2015)*. [S.l.], 2016. Citado 4 vezes nas páginas 35, 57, 58 e 59.

ERDKAMP, P. *The grain market in the Roman Empire: a social, political and economic study*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005. Citado na página 34.

ESTIGONI, M. V. et al. Análise técnica da legislação e normas sobre estudos hidrossedimentológicos em empreendimentos hidrelétricos. In: *XIV World Water Congress*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 36.

EVA, H. D. et al. *A Vegetation Map of South America*. Luxembourg, 2002. Citado na página 169.

EVENSEN, G. Using the extended kalman filter with a multilayer quasi-geostrophic ocean model. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. C11, p. 17905–17924, November 1992. Citado na página 126.

EVENSEN, G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using monte carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n. C5, p. 10143–10162, May 1994. Citado na página 127.

FABER, B. A.; STEDINGER, J. R. Reservoir optimization using sampling sdp with ensemble streamflow prediction (esp) forecasts. *Journal of Hydrology*, v. 249, n. 1-4, p. 113–133, August 2001. Citado na página 79.

FAN, F. M. *Acoplamento entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação geográfica: Integração do Modelo MGB-IPH*. Dissertação (Mestrado) — UFRGS-IPH, Porto Alegre, Dezembro 2011. Citado 4 vezes nas páginas 158, 168, 169 e 170.

FAN, F. M. et al. Ensemble streamflow predictions in the três marias basin, brazil. In: EGU GENERAL ASSEMBLY 2014. *Geophysycal Research Abstracts*. Vienna, Austria: Copernicus Publications, 2014. v. 16. Citado na página 121.

FINLAY, P. *Introducing Decision Support Systems*. 2nd edition. ed. [S.l.]: Blackwell Pub, 1994. Citado na página 78.

FINNERTY, B. D. et al. Space-time scale sensitivity of the sacramento model to radar-gage precipitation inputs. *Journal of Hydrology*, v. 203, n. 1-4, p. 21–38, December 1997. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.

FORTUNA, A. de O. *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos*. 2ª. ed. São Paulo: EDUSP-Editora da Universidade de São Paulo, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 93.

FRANCO, P. E. C. *Planejamento da operação de curto prazo em sistemas hidrelétricos de potência por modelo de fluxo em redes*. Tese (Doutorado) — UNICAMP, Campinas, SP, Outubro 1993. Citado na página 79.

FRANZ, D. D.; MELCHING, C. S. *Full Equations (FEQ) model for the solution of the Full, Dynamic Equations of Motion for One-Dimensional Unsteady Flow in Open Channels and through Control Structures*. Urbana, Illinois, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 90.

FREER, J.; BEVEN, K.; AMBROISE, B. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the glue approach. *Water Resources Research*, v. 32, n. 7, p. 2161–2173, July 1996. Citado na página 125.

GARCÍA, C. E.; PRETT, D. M.; MORARI, M. Model predictive control: Theory and practice - a survey. *Automatica*, v. 25, n. 3, p. 335–348, May 1989. Citado 2 vezes nas páginas 101 e 104.

GEORGAKAKOS, K. P.; RAJARAM, H.; LI, S. G. *On Improved Operational Hydrologic Forecasting of Streamflows*. Iowa Citty, 1988. Citado na página 126.

GEORGAKAKOS, K. P.; SPERSFLAGE, J. A. *Hydrological Forecast System-HFS: A user's manual*. San Diego, CA, 1995. Citado na página 126.

GIJSBERS, P. Opportunities and limitations of delftfews as a scientific workflow tool for environmental modeling. In: SWAYNE, D. A. et al. (Ed.). *2010 International Congress on Environmental Modelling and Software: Modelling for Environmental's Sake Fifth Biennial Meeting*. Ottawa, Canada, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 149 e 156.

GLANZMANN, G. et al. Supervisory water level control for cascaded river power plants. In: *International Conference on Hydropower*. Stavanger, Norway: [s.n.], 2005. Citado na página 112.

GNEITING, T.; RAFTERY, A. E. Waether forecasting with ensemble methods. *Science*, v. 310, p. 248–249, October 2005. Citado 2 vezes nas páginas 115 e 120.

GORDON, N. J.; SALMOND, D. J.; SMITH, A. F. M. Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation. *IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing*, v. 140, n. 2, p. 107–113, April 1993. Citado na página 128.

GREEN, C. H.; PARKER, D. J.; TUNSTALL, S. M. *Assessment of Flood Control and Management Options*. Cape Town, South Africa, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

GREGERSEN, J. B.; GIJSBERS, P. J. A.; WESTEN, S. J. P. Openmi: Open modelling interface. *Journal of Hydroinformatics*, v. 9, n. 3, p. 175–191, July 2007. Citado na página 82.

GRIENWANK, A.; WALTHER, A. *Evaluating derivatives: principles and techniques of algorithmic differentiation*. 2nd. ed. Philadelphia: SIAM-Society for Industrial and Applied Mathematics, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 106, 113 e 182.

GRIJSSEN, J. et al. An information system for flood early warning. In: SAUL, A. (Ed.). *3rd international Conference on Floods & Flood Management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1992. p. 263–264. Citado na página 84.

GRÖWE-KUSKA, N.; HEITSCH, H.; RÖMISCH, W. Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems. In: *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 3. Citado na página 123.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Toward improved parameter inference in catchment models: 1. evaluating parameter uncertainty. *Water Resources Research*, v. 34, n. 4, p. 751–763, April 1998. Citado na página 125.

GUPTA, H. V. et al. Advances in automatic calibration of watershed models. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: American Geophysical Union, 2003. p. 113–124. Citado na página 127.

HAGGETT, C. An integrated approach to flood forecasting and warning in england and wales authors. *Water and Environment*, v. 12, n. 6, p. 425–432, Decembercember 1998. Citado na página 150.

HARLIN, J.; KUNG, C.-S. Parameter uncertainty and simulation of design floods in sweden. *Journal of Hydrology*, v. 137, n. 1-4, p. 209–230, August 1992. Citado na página 70.

HÄTTENSCHWILER, P. Absturz im freien fall - anlauf zu neuen höhenflügen: gutes entscheiden in wirtschaft, politik und gesellschaft. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: vdf Hochschulverlag AG an der ETh Zürich, 2001. cap. Neues anwenderfreundliches Konzept der Entscheidungsunterstützung. Citado na página 78.

HE, Y. et al. Reservoir flood control operation based on chaotic particle swarm optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, v. 39, p. 4480–4492, March 2014. Citado na página 40.

HENDERESON, F. M. *Open CHannel Flow*. [S.l.]: McMilliam Publishing Company, 1966. Citado na página 93.

HOFFMAN, R. N.; KALNAY, E. Lagged average forecasting, an alternative to monte carlo forecasting. *Tellus A*, v. 35, n. 2, p. 100–118, 1983. Citado na página 118.

HORNBECK, R. *The Enduring Impacts of the Amreican Dust Bowl: Short and Long-Run Adjustments to Environmental Catastrophe*. [S.l.], 2009. Citado na página 36.

HOU, D.; KALNAY, E.; DROEGEMEIER, K. K. Objective verification of the samex '98 ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, v. 129, n. 1, p. 73–91, January 2001. Citado na página 119.

JI, Z.; VRIEND, H. de; HU, C. Application of sobek model in the yellow river estuary. In: *International Conference on Estuaries and Coasts*. Hangzhou China: [s.n.], 2003. Citado na página 75.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *J. Basic eng*, v. 82, n. 1, p. 35–45, March 1960. Citado na página 126.

KAZEZYILMAZ-ALHAN, C.; MEDINA, M. A. Kinematic and diffusion waves: Analytical and numerical solutions to overland and channel flow kinematic and diffusion waves: Analytical and numerical solutions to overland and channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 2, p. 217–228, February 2007. Citado na página 91.

KEARNEY, M.; DOWER, P. M.; CANTONI, M. Model predictive control for flood mitigation: A wivenhoe dam case study. In: *2011 Australian Control Conference*. Melbourne, Australia: Engineers Australia, 2011. p. 290–296. Citado na página 104.

KEEN, P. G. W.; MORTON, M. S. S. *Decision Support Systems: an organization perspective*. Reading, MA: Addison-Wesley Pub Co, 1978. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.

KEESMAN, K. Membership-set estimation using random scanning and principal component analysis. *Mathematics and Computer in Simulation*, v. 32, n. 5-6, p. 535–543, December 1990. Citado na página 125.

KITANIDIS, P. K.; BRAS, R. L. Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 1. analysis of uncertainty. *Water Resources Research*, v. 16, n. 6, p. 1025–1033, December 1980. Citado na página 126.

KITANIDIS, P. K.; BRAS, R. L. Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 2. applications and results. *Water Resources Research*, v. 16, n. 6, p. 1034–1044, December 1980. Citado na página 126.

KLEPPER, O.; SCHOLTEN, H.; KAMER, J. P. G. D. van. Prediction uncertainty in an ecological model of the oosterschelde estuary. *Journal of Forecasting*, v. 10, n. 1-2, p. 191–209, January 1991. Citado na página 125.

KNIGHT, D. W.; SHAMSELDIN, A. Y. *River Basin Modelling for Flood Risk Mitigation*. [S.l.]: CRC Press, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 37, 38, 39 e 77.

KOUWEN, N. et al. Grouped response units for distributed hydrologic modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, p. 289–305, 1993. Citado na página 142.

KRISHNAMURTI, T. N. et al. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate. *Journal of Climate*, v. 13, n. 23, p. 4196–4216, December 2000. Citado na página 119.

KUCZERA, G. Improved parameter inference in catchment models: 1. evaluating parameter uncertainty. *Water Resources Research*, v. 19, n. 5, p. 1151–1162, October 1983. Citado na página 125.

KUCZERA, G. Improved parameter inference in catchment models: 2. combining different kinds of hydrologic data and testing their compatibility. *Water Resources Research*, v. 19, n. 5, p. 1163–1172, October 1983. Citado na página 125.

KUCZERA, G. Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models. *Water Resources Research*, v. 33, n. 1, p. 177–185, January 1997. Citado na página 125.

KUMMU, M. et al. How close do we live to water? a global analysis of population distance to freshwater bodies. *PLoS ONE*, v. 6, n. 6, p. e20578–e20578, June 2011. Citado na página 76.

KUWAJIMA, J. I. et al. Oportunidades no desenvolvimento de ferramentas para modelação de otimização de operação de reservatórios para curto prazo. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Bento Gonçalves - RS: ABRH, 2013. Citado na página 124.

KUWAJIMA, J. I. et al. Trade-off assessment of simplified routing models for short-term hydropower reservoir optimization. *Geophysical Research Abstracts*, v. 16, n. EGU2014, p. 15814–1, 2014. Citado na página 76.

LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 130, n. 2, p. 93–111, March 2004. Citado 3 vezes nas páginas 81, 101 e 109.

LABADIE, J. W.; SULLIVAN, C. H. Computerized decision support systems for water managers. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 112, n. 3, p. 299–307, July 1986. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 78.

LANDON-LANE, J.; ROCKOFF, H.; H.STECKEL, R. *Droughts, Floods and Financial Distress in the United States*. [S.l.], 2009. Citado na página 36.

LEEDAL, D. et al. Application of data-based mechanistic modelling for flood forecasting at multiple locations in the eden catchment in the national flood forecasting system (england and wales). *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 1, p. 177–185, January 2013. Citado na página 84.

LEEUW, S. van der. *he Archaeomedes project: understanding the natural and anthropogenic causes of land degradation and desertification in the Mediterranean basin: research results*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998. Citado na página 34.

LEITH, C. E. Theoretical skill of monte carlo forecasts. *Monthly Weather Review*, v. 102, n. 6, p. 409–418, June 1974. Citado na página 118.

LIBÂNIO, P. A. C.; CHENICHARO, C. A. de L.; NASCIMENTO, N. de O. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 3, p. 219–210, Setembro 2005. Citado na página 34.

LIGHTHILL, M. J.; WHITMAN, G. B. On kinematic waves i. flood movement in long rivers. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, p. 281–316, 1955. Citado na página 99.

LIU, F. *SPRNT User's Manual*. 1.2.2. ed. [S.l.], 2014. Citado na página 144.

- LIU, F.; HODGES, B. R. Applying microprocessor analysis methods to river network modelling. *Environmental Modelling and Software*, v. 52, p. 234–252, February 2014. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 144.
- LLORIS, F. B. An irrigation decree from roman spain: The lex rivi hiberiensis. *Journal of Roman Studies*, v. 96, p. 147–196, 2006. Citado na página 34.
- LORENZ, E. N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 20, n. 2, p. 130–141, March 1963. Citado 2 vezes nas páginas 116 e 117.
- LORENZ, E. N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, v. 17, n. 3, p. 321–333, August 1965. Citado na página 116.
- LOUKS, D. P.; BEEK, E. van. *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. 1. ed. [S.l.]: UNESCO Publishing, 2005. (ISBN 978-3-319-44232-7). Citado na página 70.
- MADSEN, H. et al. Data assimilation in rainfall runoff forecasting. In: *4th Hydroinformatics Conference*. Cedar Rapids, Iowa: [s.n.], 2000. Citado na página 151.
- MADSEN, H.; SKOTNER, C. Adaptive state updating in real-time river flow forecasting—a combined filtering and error forecasting procedure. *Journal of Hydrology*, v. 308, n. 1-4, p. 302–312, July 2005. Citado na página 127.
- MAHMOOD, K. *Reservoir Sedimentation - Impact, Extent, and Mitigation*. Washington, D.C., 1987. Citado na página 55.
- MALATERRE, P.-O.; ROGERS, D. C.; SCHUURMANS, J. Classification of canal control algorithms. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 124, n. 1, p. 2–10, January/February 1998. Citado na página 103.
- MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em são paulo. *Revista USP*, v. 106, p. 31–44, Julho/Agosto/Setembro 2015. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- MARENGO, J. A. et al. The drought of amazonia in 2005. *Journal of Climate*, v. 21, p. 498–516, February 2008. Citado na página 36.
- MARQUES, T. C. *Uma politica operativa a usinas individualizadas para o planejamento da operação energetica do sistema interligado nacional*. Tese (Doutorado) — FEEC-UNICAMP, Campinas, SP, 2006. Citado na página 109.
- MARQUES, T. C.; CRUZ, G.; VINHAL, C. Uma nova política operativa a usinas individualizadas para o planejamento da operação energética. In: *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–7. Citado 3 vezes nas páginas 109, 110 e 111.
- MARTINEZ, L.; SOARES, S. Comparison between closed-loop and partial open-loop feedback control policies in long term hydrothermal scheduling. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 2, p. 330–336, May 2002. Citado na página 109.
- MASHRIQUI, H. S.; HALGREN, J. S.; REED, S. M. 1d river hydraulic model for operational flood forecasting in the tidal potomac: Evaluation for freshwater, tidal, and wind-driven events. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 140, n. 5, May 2014. Citado na página 74.

- MATTHIES, M.; GIUPPONI, C.; OSTENDORF, B. Environmental decision support systems: Current issues, methods and tools. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, n. 2, p. 123–127, February 2007. Citado na página 149.
- MAYNE, D. Q. et al. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, v. 36, n. 6, p. 789–814, June 2000. Citado 2 vezes nas páginas 101 e 102.
- MILLER, R. N.; GHIL, M.; GAUTHIEZ, F. Advanced data assimilation in strongly nonlinear dynamical systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 51, n. 8, p. 1037–1056, April 1994. Citado na página 126.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2024*. Brasília, DF: MME/EPE, 2015. v. 2. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.
- MOLTENI, F. et al. The ecmwf ensemble prediction system: methodology and validation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 122, p. 73–119, 1996. Citado na página 121.
- MONTERO, R. A. et al. Simplified hydraulic modelling in model predictive control of flood mitigation measures along rivers. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, v. 1, n. 1, p. 17–27, 2013. Citado na página 99.
- MORADKHANI, H. et al. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water Resources Research*, v. 41, n. 5, May 2005. Citado na página 128.
- MORADKHANI, H.; SOROOSHIAN, S. General review of rainfall-runoff modeling: Model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. In: \_\_\_\_\_. *Hydrological Modelling and the Water Cycle: Coupling the Atmospheric and Hydrological Models*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 1–24. Citado na página 70.
- MORADKHANI, H. et al. Dual state–parameter estimation of hydrological models using ensemble kalman filter. *Advances in Water Resources*, v. 28, n. 2, p. 135–147, February 2005. Citado na página 128.
- MORARI, M.; LEE, J. Model predictive control: past, present and futures. *Computer and Chemical Engineering*, p. 667–682, 1999. Citado na página 104.
- MURPHY, P. G. *The Drought of 1934*. [S.l.], 1935. Citado na página 36.
- NASR, A. et al. Physically-based, distributed, catchment modelling for estimating sediment and phosphorus loads to rivers and lakes: Issues of model complexity, spatial and temporal scales and data requirements. In: THE IRISH NATIONAL COMMITTEES OF THE INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME AND THE INTERNATIONAL COMMISSION ON IRRIGATION AND DRAINAGE. *5th National Hydrology Seminar 2004: The Water Framework Directive - Monitoring and Modelling Issues for River Basin Management*. [S.l.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- NÉELZ, S.; G.PENDER. *Benchmarking the latest generation of 2D hydraulic modelling packages*. Horison House, Deanery Road, Bristol, BS1 9AH, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- NÉELZ, S.; PENDER, G. *Desktop review of 2D hydraulic modelling packages*. Bristol, UK, 2009. Citado na página 72.



NOAA. *Evaluation of Different Hydraulic Models in Support of National Weather Service Operations*. 1325 East-West highway, Silver Springs, Maryland 20910-3283, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 45, 46, 73 e 135.

ONS. *Previsão de Vazão Diárias ao Reservatório de Três Marias usando a Técnica de redes Neurais - Revisão 01*. [S.l.], 2009. Citado na página 157.

ONS. *Submódulo 1.1 - O Operador Nacional do Sistema Elétrico e os Procedimentos de Rede: Visão geral Rev 1.0*. [S.l.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 159.

ONS. *Submódulo 26.2 - Critérios para classificação da modalidade de operação de usinas Rev.2.0*. [S.l.], 2011. Citado na página 160.

ONS. *Submódulo 9.4 - Estabelecimento das Regras para Operação de Controle de Cheias*. [S.l.], 2011. Citado na página 62.

ONS. *Diretrizes para as regras de Operação de Controle de Cheias - Bacia do Rio São Francisco (Ciclo 2015-206)*. Rio de Janeiro - RJ, Brasil, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 61, 65, 161 e 162.

OVERLOOP, P. J. van. *Model Predictive Control on Open Water Systems*. Tese (PhD Dissertation) — Technische Universiteit Delft, Delft, The Netherlands, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 104 e 112.

PALMER, T. N. et al. Probabilistic prediction of climate using multi-model ensembles: from basics to applications. *Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences*, v. 369, n. 1463, p. 1991–1998, October 2005. Citado 2 vezes nas páginas 118 e 119.

PARKER, B. J.; AL-UTAIBI, G. A. Decision support systems: The reality that seems hard to accept? *Omega*, v. 14, n. 2, p. 135–143, 1986. Citado na página 77.

PENDER, G. Briefing: Introducing the flood risk management research consortium. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, v. 159, n. 1, p. 3–8, March 2006. Citado 2 vezes nas páginas 72 e 87.

PINHO, J. L. S.; VIEIRA, P. M. Aspectos da aplicação do delft hydraulics ‘sobek’ no desenvolvimento de um sistema de gestão operacional da água em alqueva. In: ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS. *8º Congresso da Água*. [S.l.], 2006. Citado 3 vezes nas páginas 139, 140 e 141.

PONTES, P. R. M. P.; COLLISCHONN, W. Conservação de volume em modelos simplificados de propagação de vazão. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos hídricos*, ABRH, v. 17, n. 4, p. 83–96, 2012. Citado na página 142.

PORTO, R. de M. *Hidráulica Básica*. 4a edição. ed. São Carlos-SP: EESC-USP, 1999. Citado na página 94.

POWER, D. J. *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*. 88 Post Road West, Westport: Quorum Books division Greenwood Publishing, 2002. Citado na página 78.

RASO, L. et al. Tree structure generation from ensemble forecasts for real time control. *Hydrological Processes*, v. 27, p. 75–82, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 122 e 123.

- REFSGAARD, J. C. Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Hydrology Research*, v. 28, n. 2, p. 65–84, April 1997. Citado na página 126.
- REICHLER, R. H.; ENTEKHABI, D.; MCLAUGHLIN, D. B. Downscaling of radio brightness measurements for soil moisture estimation: A four-dimensional variational data assimilation approach. *Water Resources Research*, v. 37, n. 9, p. 2353–2364, September 2001. Citado na página 127.
- RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos: EESC/USP, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.
- RIZZOLI, A. E. et al. Integrated modelling frameworks for environmental assessment and decision support. In: JAKEMAN A.A. VOINOV, A. R. A.; CHEN, S. (Ed.). *Environmental Modelling, Software and Decision Support*. [S.l.]: Elsevier, 2008, (Developments in Integrated Environmental Assessment, v. 3). cap. 7, p. 101–118. Citado na página 151.
- RODRÍGUEZ, I. O. *Operation of multi-purpose reservoirs: simulation study comparing fixed rules and real-time control*. Dissertação (Master's Thesis) — RWTH Aachen - Institute of Hydraulic Engineering and Water resource Management, Aachen Germany, 2013. Citado na página 76.
- ROO, A. P. de et al. Development of a european flood forecasting system. *International Journal of River Basin Management*, v. 1, n. 1, p. 49–59, August 2003. Citado na página 152.
- RUSSELL, C. S. et al. *Investing in Water Quality: Measuring Benefits, Costs and Risks*. Washington, D.C., 2001. Citado na página 77.
- ŞAHİN, A.; MORARI, M. Intelligent infrastructures. In: \_\_\_\_\_. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. cap. Decentralized Model Predictive Control for a Cascade of River Power Plants, p. 463–485. Citado na página 112.
- SANTOS, M. R. A. dos. *Rio São Francisco: patrimônio cultural e natural*. Belo Horizonte, MG: Assembléia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 2003. Citado na página 158.
- SCHILLING, W.; MARTENS, J. Recursive state and parameter estimation with applications in water resources. *Applied Mathematical Modelling*, v. 10, n. 6, p. 433–437, December 1986. Citado na página 126.
- SCHUURMANS, J. *Control of Water Levels in Open-Channels*. Tese (PhD Thesis) — Technische Universiteit Delft, Delft, The Netherlands, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 45, 103, 134 e 175.
- SCHUURMANS, J.; BOSGRA, O.; BROUWER, R. Open-channel flow model approximation for controller design. *Applied Mathematical Modelling*, v. 19, p. 525–530, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 45, 135 e 213.
- SCHUURMANS, J. et al. Modeling of irrigation and drainage canals for controller design. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, p. 338–344, November/December 1999. Citado 2 vezes nas páginas 112 e 135.
- SCHWANENBERG, D. *RTC-Tools Technical Reference & Configuration Guide Version 0.9 Beta (April 2010)*. Delft, The Netherlands, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 132 e 133.

SCHWANENBERG, D. *RTC-Tools for Modelling Real-Time Control*. Delft, The Netherlands, 2013. Citado na página 76.

SCHWANENBERG, D.; BECKER, B. *RTC- Tools Software Tools for Modelling Real-Time Control*. Delft, The Netherlands, 2014. Citado na página 132.

SCHWANENBERG, D.; BREUKELLEN, A. van; HUMMEL, S. Data assimilation for supporting optimum control in large-scale river networks. In: *2011 International Conference on Networking, Sensing and Control*. Delft, The Netherlands: [s.n.], 2011. Citado na página 102.

SCHWANENBERG, D. et al. Short-term reservoir optimization for flood mitigation under meteorological and hydrological forecast uncertainty: Application to the três marias reservoir in Brazil. *Water Resources Management*, v. 29, n. 5, p. 1635–1651, March 2015. Citado 3 vezes nas páginas 116, 123 e 158.

SCHWANENBERG, D. et al. Model predictive control of pumps and gates for draining Dutch polder systems. In: *10th International Conference on Hydroinformatics Hamburg, Germany / Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions*. [S.l.]: TuTech Verlag TuTech Innovation GmbH, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 76, 103 e 112.

SCHWANENBERG, D.; PATZKE, S. *Machbarkeitsstudie Steuerreglement Oberrhein / Modellierung in SOBEK*. [S.l.], 2008. Citado na página 76.

SCHWANENBERG, D. et al. Adjoint modeling framework for water resources models. In: *10th International Conference on Hydroinformatics Hamburg, Germany / Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions*. [S.l.]: TuTech Verlag TuTech Innovation GmbH, 2012. Citado na página 103.

SCHWANENBERG, D. et al. Short-term reservoir optimization for mitigation downstream flood risk. In: *8th International Conference of EWRA "Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context"*. Porto Portugal: [s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 76, 86 e 165.

SCHWANENBERG, D.; VERHOEVEN, G. F.; BOOGAARD, H. van den. Nonlinear model predictive control of flood detention basins in operational flood forecasting. In: *9th International Conference on Hydroinformatics - HIC 2010*. Tianjin, China: [s.n.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 76 e 112.

SEO, D.-J.; KOREN, V.; CAJINA, N. Real-time variational assimilation of hydrologic and hydrometeorological data into operational hydrologic forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, v. 4, n. 3, p. 627–641, June 2003. Citado 2 vezes nas páginas 126 e 127.

SHUMAN, F. G. History of numerical weather prediction at the national meteorological center. *Weather and Forecasting*, v. 4, p. 286–296, September 1989. Citado na página 115.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE, H. H. G.; BLÖSCHL, G. Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, v. 26, p. 1270–1276, 2012. Citado na página 33.

SOROOSHIAN, S.; DRACUP, J. A. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, v. 6, n. 2, p. 430–442, April 1980. Citado na página 125.

SOROOSHIAN, S.; DUAN, Q.; GUPTA, V. K. Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the sacramento soil moisture accounting model. *Water Resources Research*, v. 29, n. 4, p. 1185–1194, April 1993. Citado na página 125.

SPRAGUE, R. H.; CARLSON, E. D. *Building Effective Decision Support Systems*. [S.l.]: Pearson Education Canada, 1982. Citado na página 77.

STENSRUD, D. J.; WEISS, S. J. Mesoscale model ensemble forecasts of the 3 may 1999 tornado outbreak. *Weather and Forecasting*, v. 17, n. 3, p. 526–543, June 2002. Citado na página 119.

STRATEN, G. T. van; KEESMAN, K. J. Uncertainty propagation and speculation in projective forecasts of environmental change: A lake-eutrophication example. *Journal of Forecasting*, v. 10, n. 1-2, p. 163–190, January 1991. Citado na página 125.

ŠUTIENĖ, K.; MAKACKAS, D.; PRANEVIČIUS, H. Multistage k-means clustering for scenario tree construction. *Informatica*, v. 21, n. 1, p. 123–138, January 2010. Citado na página 122.

TAREKEGN, T. H. et al. Assessment of an aster-generated dem for 2d hydrodynamic flood modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 12, n. 6, p. 457–465, December 2010. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 75.

TARIQ, M. A. U. R.; GIESEN, N. van de. Floods and flood management in pakistan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 47-48, p. 11–20, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 85.

TAYLOR, J. W.; BUIZZA, R. Using weather ensemble predictions in electricity demand forecasting. *International Journal of Forecasting*, v. 19, n. 1, p. 57–70, 2003. Citado na página 119.

THIEMANN, M. et al. Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models. *Water Resources Research*, v. 37, n. 10, p. 2521–2535, October 2001. Citado 2 vezes nas páginas 125 e 127.

TODINI, E.; A.SZÖLLÖSI-NAGY; WOOD, E. F. Adaptive state/parameter estimation algorithms for real-time hydrologic forecasting: a case study. In: *IIASA/WMO Workshop Recent Developments Real-Time Forecasting/Control Water Resource Sys*. Laxenburg, Austria: [s.n.], 1976. Citado na página 126.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 69.

TUCCI, C. E. M. et al. Short- and long-term flow forecasting in the rio grande watershed (brazil). *Atmospheric Science Letters*, v. 9, n. 2, p. 53–56, April/June 2008. Citado na página 72.

TURBAN, E. *Decision Support and Expert Systems: Management Support Systems*. 4th edition. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1995. Citado na página 78.

TWIGT, D. J. et al. Coupled 1d-3d hydrodynamic modelling with application to the pearl river delta. *Ocean Dynamics*, v. 59, n. 6, p. 1077, December 2009. Citado na página 75.

UNESCO. THE UNITED NATIONS WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT. *THE UNITED NATIONS WORLD WATER DEVELOPMENT REPORT 3: WATER IN A CHANGING WORLD*. Paris: UNESCO Publishing and Earthscan, 2009. v. 3. Citado na página 55.

VERWEY, A. et al. The potential of the delft-fews flood forecasting platform for application in the mekong basin. In: *4th Annual Mekong Flood Forum*. Siem Reap, Cambodia: [s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 152.

VÖRÖSMARTY, C. J. et al. The potential impact of neo-castorization on sediment transport by the global network of rivers. In: WALLING, D.; PROBST, J.-L. (Ed.). *Human Impact on Erosion and Sedimentation - Proceedings of the Fifth Scientific Assembly of th IAHS*. Rabat, Morocco: IAHS Publication, 1997. Citado na página 55.

VRUGT, J. A. et al. Toward improved identifiability of hydrologic model parameters: The information content of experimental data authors toward improved identifiability of hydrologic model parameters: The information content of experimental data authors toward improved identifiability of hydrologic model parameters: The information content of experimental data. *Water Resources Research*, v. 38, n. 12, p. 48–1–48–13, December 2002. Citado na página 127.

VRUGT, J. A. et al. Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strenghts of global optimization and data assimilation. *Water Resources Research*, v. 41, n. 1, January 2005. Citado 2 vezes nas páginas 125 e 127.

VRUGT, J. A. et al. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research*, v. 39, n. 8, August 2003. Citado na página 125.

VRUGT, J. A. et al. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, v. 39, n. 8, August 2003. Citado 2 vezes nas páginas 125 e 127.

VRUGT, J. A. et al. Application of stochastic parameter optimization to the sacramento soil moisture accounting model. *Journal of Hydrology*, v. 325, n. 1-4, p. 288–307, June 2006. Citado na página 125.

VRUGT, J. A. et al. Real-time data assimilation for operational ensemble streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*, v. 7, n. 3, p. 548–565, June 2006. Citado 4 vezes nas páginas 124, 125, 126 e 128.

WÄCHTER, A. Short tutorial: Getting started with ipopt in 90 minutes. In: *Dagstuhl Seminar Proceedings 09061*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 113.

WÄCHTER, A.; BIEGLER, L. T. On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical Programming*, p. 25–27, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 113 e 181.

WAGENER, T. et al. Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 2, p. 455–476, February 2003. Citado na página 127.

WEERTS, A. H.; SCHELLEKENS, J.; WEILAND, F. S. Real-time geospatial data handling and forecasting: Examples from delft-fews forecasting platform/system. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 3, n. 3, p. 386–394, September 2010. Citado 3 vezes nas páginas 85, 147 e 148.

WERNER, M.; DIJK, M. van. Developing flood forecasting systems: Examples from the uk, europe, and pakistan. In: *International Conference on Innovation and Implementaion of Flood Forecasting Technology*. Tromsø, Norway: [s.n.], 2005. Citado 2 vezes nas páginas 84 e 163.

- WERNER, M. et al. The delft-fews flow forecasting system. *Environmental Modelling & Software*, v. 40, p. 65–77, February 2013. Citado 9 vezes nas páginas 84, 85, 145, 148, 150, 151, 153, 154 e 155.
- WESTERINK, J. J. et al. Tide and storm surge predictions using finite element model. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 118, n. 19, p. 1373–1390, October 1992. Citado na página 74.
- WHITFIELD, D. The national flood forecasting system (nffs) of the uk environmental agency. In: *International Conference on Innovation and Implementaion of Flood Forecasting Technology*. Tromsø, Norway: [s.n.], 2005. Citado na página 85.
- WILSON, A. *Water Management and Usage in Roman North Africa: A Social and Technological Study*. [S.l.]: University of Oxford, 1997. Citado na página 34.
- WOOD, E. F.; O’CONNEL, P. E. Hydrological forecasting. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1985. cap. Real-Time Forecasting. Citado na página 126.
- WORLD COMISSION ON DAMS. *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. London, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 56.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guidelines on Esemble Prediction Systems and Forecasting*. Geneva, Switzerland, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 115 e 121.
- XU, M.; SCHWANENBERG, D. Comparison of sequential and simultaneous model predictive control of reservoir systems. In: *10th International Conference on Hydroinformatics Hamburg, Germany / Understanding Changing Climate and Environment and Finding Solutions*. Hamburgo, Alemanha: TuTech Verlag TuTech Innovation GmbH, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 105 e 113.
- YEH, W. W.-G. Reservoir management and operations models: A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, v. 21, n. 12, p. 1797–1818, December 1985. Citado 2 vezes nas páginas 81 e 101.
- YOUNG, P. C. Advances in real-time flood forecasting. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 360, n. 1796, p. 1433–1450, May 2002. Citado na página 126.
- YOUNG, P. C.; BEVEN, K. J. Data-based mechanistic modelling and the rainfall-flow non-linearity. *Environmetrics*, v. 5, n. 3, p. 335–363, September 1994. Citado na página 125.
- ZAMBELLI, M. et al. Newave versus odin: comparison of stochastic and deterministic models for the long term hydropower scheduling of the interconnected brazilian system. *Sba Controle & Automação*, v. 22, n. 6, p. 598–609, Nov/Dec 2011. Citado na página 109.
- ZHANG, X.; LINDSTRÖM, G. Development of an automatic calibration scheme for the hbv hydrological model. *Hydrological Processes*, v. 11, n. 12, p. 1671–1682, October 1997. Citado na página 70.
- ZHANG, Z.; KRISHNAMURTI, T. N. A pertubation method for hurricane ensemble predictions. *Monthly Weather Review*, v. 127, n. 4, p. 447–469, April 1999. Citado na página 119.

# Anexos





# ANEXO A – Caracterização de Situação para Operação - ONS

## Notas

- a) Caracterização de Cheia: Previsão ou ocorrência de vazões naturais, nos pontos de controle, superiores às restrições de vazões máximas consideradas;
- b) Ocupação de volumes de espera: Volumes vazios disponíveis iguais ou inferiores aos volumes de espera estabelecidos;
- c) Indicativo de violação de restrições hidráulicas: Obtido com base nos estados de armazenamentos, de afluências aos reservatórios e de vazões incrementais entre os reservatórios e os pontos de controle, bem como de nível da água no ponto de controle.
- d) Caracterização de seca: Período prolongado em que a ausência ou carência de chuvas, em uma região ou bacia hidrográfica, acarreta baixas afluências aos seus reservatórios.
- e)  $V_{ATAL}$ : % de volume de espera Atenção-Alerta.

Tabela 37 – Critérios para caracterização da Situação de Operação no período de controle de cheias - PCC (Parte I).

Responsável pela coordenação da operação do(s) reservatório(s)	Situação de Operação	Caracterização da Situação
ONS	Normal	<p>Não há indicativo de violação de quaisquer das restrições operativas hidráulicas máximas ou mínimas, registradas pelo Agente junto ao ONS, ou informadas em tempo real:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Não há ocupação de volumes de espera; e</li> <li>- Não há caracterização de cheias; e</li> <li>- Não há situações de secas prolongadas, e as vazões naturais no ponto de controle são iguais ou superiores às restrições hidráulicas de vazões mínimas.</li> </ul>
	Alerta	<p>Não há indicativo de violação de quaisquer das restrições operativas hidráulicas máximas ou mínimas, registradas pelo Agente junto ao ONS ou informadas em tempo real; e</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Há ocupação de volumes de espera até o <math>V_{ATAL}</math>; ou</li> <li>- Há situações de secas prolongadas com vazões naturais no ponto de controle, inferiores às restrições hidráulicas de vazões mínimas, ocasionando o deplecionamento do reservatório ou reservatório equivalente; ou</li> <li>- O nível d'água do reservatório é superior ao máximo operativo normal ou inferior ao mínimo operativo normal, estabelecido para o reservatório; ou</li> </ul> <p>Há indisponibilidade de equipamentos hidráulicos e ou elétricos que afetam o controle operacional do(s) reservatório(s), sem previsão de retorno à operação; ou</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Há necessidade de procedimentos específicos para a não violação de restrição não usual ou não cadastrada anteriormente.</li> </ul>

Tabela 38 – Critérios para caracterização da Situação de Operação no período de controle de cheias - PCC (Parte II).

Responsável pela coordenação da operação do(s) reservatório(s)	Situação de Operação	Caracterização da Situação
Agente de Geração	Alerta	<p>Há indicativo de violação de quaisquer das restrições operativas hidráulicas máximas ou mínimas, registradas pelo Agente junto ao ONS ou informadas em tempo real; e</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Há caracterização de cheia e há ocupação de volumes de espera acima do <math>V_{ATAL}</math>; ou</li> <li>- Há situações de secas prolongadas com vazões naturais no ponto de controle, inferiores às restrições hidráulicas de vazões mínimas, ocasionando o deplecionamento do reservatório ou reservatório equivalente; ou</li> <li>- O nível d'água do reservatório é superior ao máximo operativo normal ou inferior ao mínimo operativo normal, estabelecido para o reservatório; ou &amp; &amp; - Há indisponibilidade de equipamentos hidráulicos e ou elétricos que afetam o controle operacional do(s) reservatório(s), sem previsão de retorno à operação; ou</li> <li>- Há necessidade de procedimentos específicos para a não violação de restrição não usual ou não cadastrada anteriormente.</li> </ul>
Agente de Geração	Emergência	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Há perda total de comunicação entre a usina e o centro de operação de seu relacionamento; ou</li> <li>- Há violação de quaisquer das restrições operativas hidráulicas máximas ou mínimas, registradas pelo Agente junto ao ONS ou informadas em tempo real; e</li> <li>- Há situações de secas prolongadas com vazões naturais no ponto de controle, inferiores às restrições hidráulicas de vazões mínimas, ocasionando o deplecionamento do reservatório ou reservatório equivalente; ou</li> <li>- O nível d'água do reservatório é superior ao máximo operativo normal ou inferior ao mínimo operativo normal, estabelecido para o reservatório; ou</li> <li>- Há indisponibilidade de equipamentos hidráulicos e/ou elétricos que afetam o controle operacional do(s) reservatório(s), sem previsão de retorno à operação; ou</li> <li>- Há fatos não hidráulicos ocorridos a montante ou a jusante que comprometem a operação do reservatório.</li> </ul>



# Apêndices



# APÊNDICE A – Dados Batimétricos do Rio São Francisco e do Rio Abaetés

Tabela 39 – Características Geométricas da Seção 35200 do Rio Abaetés

Nº	h(m)	z(m)
1	337.5	548.36
2	339.5	547.35
3	341.5	547.35
4	343.5	546.72
5	345.5	545.35
6	347.5	545.24
7	349.5	545.24
8	351.5	545.15
9	353.5	544.57
10	355.5	544.87
11	357.5	544.79
13	359.5	544.56
14	361.5	544.31
15	363.5	544.31
16	365.5	544.19
17	367.5	544.15
18	369.5	543.95
19	371.5	543.98
20	373.5	544.02
21	375.5	544.02
22	377.5	544.1
23	379.5	544.22
24	381.5	544.3
25	383.5	544.3
26	385.5	544.31
27	387.5	544.32
28	389.5	544.32
29	391.5	544.33
30	393.5	544.34
31	395.5	544.34
32	397.5	544.36
33	399.5	544.36
34	401.5	544.36
35	403.5	544.38
36	405.5	544.38
37	407.5	544.39
38	409.5	544.49
39	411.5	544.66
40	413.5	546.79
41	415.5	547.88
42	420.11	551.56



Tabela 40 – Características Geométricas da Seção 34000 do Rio Abaetés

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	208.98	547.62	33	275.32	543.55
2	214.66	545.4	34	275.32	543.55
3	215.32	545.35	35	277.32	543.59
4	217.32	544.11	36	279.32	543.71
5	219.32	543.82	37	281.32	543.82
6	221.32	543.32	38	283.32	543.99
7	223.32	543.28	39	285.32	544.11
8	225.32	543.36	40	287.32	544.21
9	227.32	543.42	41	289.32	544.32
10	229.32	543.6	42	291.32	544.4
11	231.32	543.88	43	293.32	544.41
12	233.32	543.91	44	295.32	544.79
13	235.32	544.03	45	297.32	544.89
14	237.32	544.1	46	299.32	545
15	239.32	544.13	47	301.32	544.99
16	241.32	544.17	48	303.32	544.99
17	243.32	543.91	49	305.32	544.99
18	245.32	543.76	50	307.32	544.89
19	247.32	543.66	51	309.32	544.72
20	249.32	543.21	52	311.32	544.6
21	251.32	543.31	53	313.32	544.69
22	253.32	543.31	54	315.32	544.71
23	255.32	543.32	55	317.32	544.74
24	257.32	543.61	56	319.32	544.71
25	259.32	543.52	57	321.32	544.71
26	261.32	543.4	58	323.32	544.64
27	263.32	543.34	59	325.32	544.82
28	265.32	543.32	60	327.32	544.92
29	267.32	543.3	61	329.32	545.4
30	269.32	543.29	62	331.32	545.4
31	271.32	543.26	63	336.92	547.62
32	273.32	543.31	-	-	-

Tabela 41 – Características Geométricas da Seção 30100 do Rio Abaetés

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	132.43	537.53	28	184	535.31
2	133	537.4	29	186	535.3
3	134	537.18	30	188	534.81
4	136	536.72	31	190	534.29
5	138	536.27	32	192	533.77
6	140	535.99	33	194	533.5
7	142	535.9	34	196	533.51
8	144	535.81	35	198	533.51
9	146	535.73	36	200	533.51
10	148	535.64	37	202	533.51
11	150	535.56	38	204	533.51
12	152	535.51	39	206	533.51
13	154	535.52	40	208	533.5
14	156	535.53	41	210	533.5
15	158	535.54	42	212	533.5
16	160	535.55	43	214	533.55
17	162	535.55	44	216	533.6
18	164	535.54	45	218	533.66
19	166	535.53	46	220	533.79
20	168	535.49	47	222	534.04
21	170	535.44	48	224	534.3
22	172	535.4	49	226	534.55
23	174	535.37	50	228	534.8
24	176	535.34	51	230	533.26
25	178	535.31	52	232	536.4
26	180	535.31	53	234	537.54
27	182	535.31	-	-	-

Tabela 42 – Características Geométricas da Seção 24200 do Rio Abaetés

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	353.2	523.54	30	410	522.43
2	354	523.35	31	412	522.25
3	356	522.96	32	414	522.2
4	358	522.58	33	416	522.15
5	360	522.52	34	418	522.02
6	362	522.62	35	420	521.93
7	364	522.72	36	422	521.88
8	366	522.75	37	424	521.83
9	368	522.75	38	426	521.77
10	370	522.84	39	428	521.63
11	372	522.95	40	430	521.43
12	374	522.87	41	432	521.24
13	376	522.82	42	434	521.06
14	378	522.79	43	436	521.04
15	380	522.76	44	438	521.01
16	382	522.73	45	440	520.99
17	384	522.7	46	442	520.93
18	386	522.68	47	444	520.71
19	388	522.68	48	446	520.49
20	390	522.73	49	448	520.14
21	392	522.8	50	450	520.06
22	394	522.8	51	452	520.28
23	396	522.72	52	454	520.51
24	398	522.69	53	456	520.77
25	400	522.71	54	458	521.67
26	402	522.64	55	460	522.56
27	404	522.61	56	462	523.54
28	406	522.58	57	465.23	525.12
29	408	522.53	-	-	-

Tabela 43 – Características Geométricas da Seção 20400 do Rio Abaetés

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	256.74	521.72	32	316.71	520.04
2	257.71	521.21	33	318.71	520.06
3	258.71	520.57	34	320.71	520.09
4	260.71	519.9	35	322.71	520.12
5	262.71	519.41	36	324.71	520.15
6	264.71	518.99	37	326.71	520.19
7	266.71	519.02	38	328.71	520.24
8	268.71	519.04	39	330.71	520.28
9	270.71	519.07	40	332.71	520.32
10	272.71	519.18	41	334.71	520.43
11	274.71	519.34	42	336.71	520.57
12	276.71	519.5	43	338.71	520.76
13	278.71	519.66	44	340.71	521.01
14	280.71	519.78	45	342.71	520.71
15	282.71	519.9	46	344.71	520.48
16	284.71	519.94	47	346.71	520.69
17	286.71	519.88	48	348.71	520.25
18	288.71	519.82	49	350.71	520.52
19	290.71	519.76	50	352.71	520.8
20	292.71	519.7	51	354.71	521.08
21	294.71	519.75	52	356.71	521.1
22	296.71	519.81	53	358.71	521.07
23	298.71	519.86	54	360.71	521.04
24	300.71	519.93	55	362.71	521.04
25	302.71	519.94	56	364.71	521.12
26	304.71	519.94	57	366.71	521.05
27	306.71	519.94	58	368.71	520.97
28	308.71	519.95	59	370.71	521.18
29	310.71	519.97	60	372.71	521.46
30	312.71	519.99	61	374.71	521.72
31	314.71	520.02	-	-	-

Tabela 44 – Características Geométricas da Seção 19300 do Rio Abaetés

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	81.39	517.98	27	131.79	516.03
2	82.79	517.85	28	133.79	516.27
3	83.79	517.61	29	135.79	516.5
4	85.79	517.12	30	137.79	516.58
5	87.79	516.63	31	139.79	516.67
6	89.79	516.14	32	141.79	516.71
7	91.79	515.87	33	143.79	516.72
8	93.79	516.53	34	145.79	516.72
9	95.79	516.23	35	147.79	516.71
10	97.79	515.93	36	149.79	516.7
11	99.79	515.63	37	151.79	516.68
12	101.79	515.57	38	153.79	516.81
13	103.79	515.19	39	155.79	517.01
14	105.79	515.02	40	157.79	517.18
15	107.79	514.86	41	159.79	516.91
16	109.79	514.71	42	161.79	516.63
17	111.79	514.77	43	163.79	516.36
18	113.79	514.84	44	165.79	516.23
19	115.79	514.87	45	167.79	516.31
20	117.79	514.84	46	169.79	516.4
21	119.79	514.91	47	171.79	516.56
22	121.79	515.16	48	173.79	516.71
23	123.79	515.4	49	175.79	517.13
24	125.79	515.63	50	177.79	517.55
25	127.79	515.75	51	179.79	517.98
26	129.79	515.86	-	-	-

Tabela 45 – Características Geométricas da Seção 16500 do Rio Abaetés

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	130.71	515.21	25	178.13	511.06
2	132.13	514.67	26	180.13	511.3
3	134.13	514.24	27	182.13	511.63
4	136.13	513.82	28	184.13	512.06
5	138.13	513.38	29	186.13	512.5
6	140.13	512.87	30	188.13	512.84
7	142.13	512.51	31	190.13	513.14
8	144.13	512.45	32	192.13	513.33
9	146.13	512.4	33	194.13	513.28
10	148.13	512.35	34	196.13	513.23
11	150.13	512.3	35	198.13	513.18
12	152.13	512.24	36	200.13	513.13
13	154.13	512.19	37	202.13	513.34
14	156.13	512.14	38	204.13	513.59
15	158.13	511.88	39	206.13	513.78
16	160.13	511.57	40	208.13	513.67
17	162.13	511.26	41	210.13	513.56
18	164.13	510.94	42	212.13	513.55
19	166.13	510.63	43	214.13	513.54
20	168.13	510.51	44	216.13	513.56
21	170.13	510.59	45	218.13	513.6
22	172.13	510.67	46	220.13	513.63
23	174.13	510.75	47	222.13	514.22
24	176.13	510.83	48	224.13	515.21

Tabela 46 – Características Geométricas da Seção 12400 do Rio Abaetés

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	294.85	511.31	31	353.65	509.64
2	295.65	511.19	32	355.65	509.7
3	297.65	510.83	33	357.65	509.7
4	299.65	510.48	34	359.65	509.58
5	301.65	510.12	35	361.65	509.47
6	303.65	509.76	36	363.65	509.36
7	305.65	509.66	37	365.65	509.25
8	307.65	509.69	38	367.65	509.35
9	309.65	509.71	39	369.65	509.43
10	311.65	509.74	40	371.65	509.46
11	313.65	509.74	41	373.65	509.49
12	315.65	509.74	42	375.65	509.47
13	317.65	509.74	43	377.65	509.44
14	319.65	509.74	44	379.65	509.43
15	321.65	509.72	45	381.65	509.44
16	323.65	509.66	46	383.65	509.42
17	325.65	509.61	47	385.65	509.34
18	327.65	509.55	48	387.65	509.36
19	329.65	509.53	49	389.65	509.43
20	331.65	509.54	50	391.65	509.51
21	333.65	509.54	51	393.65	509.45
22	335.65	509.54	52	395.65	509.36
23	337.65	509.54	53	397.65	509.28
24	339.65	509.53	54	399.65	509.3
25	341.65	509.5	55	401.65	509.45
26	343.65	509.48	56	403.65	509.6
27	345.65	509.46	57	405.65	509.78
28	347.65	509.44	58	407.65	510.05
29	349.65	509.5	59	409.65	510.68
30	351.65	509.57	60	411.65	511.31

Tabela 47 – Características Geométricas da Seção RA0 do Rio Abaetés - Parte I

1	0	521.73	28	983	504.24	55	1126	502.19	82	1180	501.66
2	83	520.54	29	995	504.33	56	1128	502.24	83	1182	501.6
3	195	520.11	30	1005	504.38	57	1130	502.29	84	1184	501.61
4	299	519.83	31	1020	504.34	58	1132	502.35	85	1186	501.62
5	337	518.95	32	1035	504	59	1134	502.22	86	1188	501.63
6	355	518.92	33	1058	504.14	60	1136	502.08	87	1190	501.58
7	400	517.28	34	1066	503.78	61	1138	501.87	88	1192	501.5
8	445	514.88	35	1073	503.9	62	1140	501.68	89	1194	501.43
9	487	512.53	36	1079	503.74	63	1142	501.71	90	1196	501.36
10	547	510.74	37	1084	503.81	64	1144	501.74	91	1198	501.28
11	558	510.85	38	1086	504.14	65	1146	501.67	92	1200	501.19
12	607	510.75	39	1092	506.71	66	1148	501.63	93	1202	501.06
13	658	510.86	40	1095	507.94	67	1150	501.66	94	1204	500.88
14	708	511.59	41	1098	507.88	68	1152	501.68	95	1206	500.81
15	759	511.79	42	1102	505.36	69	1154	501.71	96	1208	500.75
16	810	511.44	43	1103	504.22	70	1156	501.75	97	1210	500.69
17	860	511.77	44	1103.66	504.24	71	1158	501.79	98	1212	500.64
18	910	504.24	45	1106	504.22	72	1160	501.81	99	1214	500.65
19	915	502.29	46	1108	504.19	73	1162	501.81	100	1216	500.67
20	921	502.02	47	1110	503.79	74	1164	501.8	101	1218	500.68
21	927	502.13	48	1112	503.28	75	1166	501.76	102	1220	500.69
22	934	502.07	49	1114	502.8	76	1168	501.72	103	1222	500.7
23	944	501.76	50	1116	502.31	77	1170	501.71	104	1224	500.72
24	953	501.9	51	1118	501.83	78	1172	501.75	105	1226	500.73
25	964	502.39	52	1120	501.97	79	1174	501.78	106	1228	500.74
26	971	502.45	53	1122	502.1	80	1176	501.81	107	1230	500.76
27	978	504.24	54	1124	502.17	81	1178	501.74	108	1232	500.73



Tabela 48 – Características Geométricas da Seção RA0 do Rio Abaetés - Parte II

109	1234	500.61	135	1286	501.68	161	1338	503.02	187	1390	503.43
110	1236	500.5	136	1288	501.73	162	1340	502.98	188	1392	503.4
111	1238	500.39	137	1290	501.78	163	1342	502.95	189	1394	503.38
112	1240	500.28	138	1292	501.83	164	1344	502.96	190	1396	503.35
113	1242	500.17	139	1294	501.99	165	1346	503.03	191	1398	503.34
114	1244	500.06	140	1296	502.2	166	1348	503.1	192	1400	503.41
115	1246	499.95	141	1298	502.4	167	1350	503.17	193	1402	503.47
116	1248	499.85	142	1300	502.59	168	1352	503.22	194	1404	503.54
117	1250	499.86	143	1302	502.71	169	1354	503.26	195	1406	503.44
118	1252	499.87	144	1304	502.44	170	1356	503.3	196	1408	503.35
119	1254	499.88	145	1306	502.64	171	1358	503.34	197	1410	503.25
120	1256	499.89	146	1308	502.93	172	1360	503.35	198	1412	503.17
121	1258	499.91	147	1310	503	173	1362	503.35	199	1414	503.53
122	1260	499.92	148	1312	502.7	174	1364	503.34	200	1416	503.89
123	1262	499.93	149	1314	502.39	175	1366	503.34	201	1418	504.22
124	1264	500.03	150	1316	502.45	176	1368	503.35	202	1425.35	505.5
125	1266	500.23	151	1318	502.52	177	1370	503.36	203	1436.79	506.55
126	1268	500.42	152	1320	502.58	178	1372	503.38	204	1445.52	507.71
127	1270	500.61	153	1322	502.64	179	1374	503.39	205	1452.59	510.11
128	1272	500.61	154	1324	502.71	180	1376	503.37	206	1458.47	512.59
129	1274	500.61	155	1326	502.8	181	1378	503.32	207	1461.49	514.62
130	1276	500.71	156	1328	502.89	182	1380	503.26	208	1469.13	516.5
131	1278	500.97	157	1330	502.98	183	1382	503.2	209	1476.32	518.11
132	1280	501.21	158	1332	503.07	184	1384	503.23	210	1485.27	519.96
133	1282	501.45	159	1334	503.09	185	1386	503.29	211	1494.31	521.77
134	1284	501.62	160	1336	503.05	186	1388	503.36	-	-	-

Tabela 49 – Características Geométricas da Seção SF159600 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	531.29	42	310.54	509.34	83	392.54	509.42	124	474.54	510.81
2	21.15	530.73	43	312.54	509.34	84	394.54	509.42	125	476.54	510.87
3	35.35	530.11	44	314.54	509.33	85	396.54	509.41	126	478.54	510.93
4	49.04	529.29	45	316.54	509.33	86	398.54	509.4	127	480.54	511
5	61.13	528.69	46	318.54	509.33	87	400.54	509.38	128	482.54	511.06
6	90.57	527.32	47	320.54	509.33	88	402.54	509.32	129	484.54	511.12
7	105.49	526.5	48	322.54	509.33	89	404.54	509.27	130	486.54	511.19
8	118.36	525.54	49	324.54	509.33	90	406.54	509.22	131	488.54	511.25
9	134.01	524.53	50	326.54	509.33	91	408.54	509.07	132	490.54	511.31
10	146.07	523.51	51	328.54	509.33	92	410.54	509.2	133	492.54	511.31
11	164.31	521.55	52	330.54	509.33	93	412.54	509.33	134	494.54	511.31
12	190.03	519.56	53	332.54	509.33	94	414.54	509.59	135	496.54	511.3
13	208.87	519.16	54	334.54	509.34	95	416.54	509.72	136	498.54	511.29
14	244.21	519.02	55	336.54	509.34	96	418.54	509.89	137	500.54	511.28
15	254.11	516.02	56	338.54	509.34	97	420.54	509.89	138	502.54	511.28
16	259.6	513.8	57	340.54	509.34	98	422.54	510.97	139	504.54	511.48
17	260.54	512.5	58	342.54	509.34	99	424.54	510.06	140	506.54	511.62
18	262.54	511.8	59	344.54	509.34	100	426.54	510.14	141	508.54	511.76
19	264.54	511.62	60	346.54	509.34	101	428.54	510.23	142	510.54	511.9
20	266.54	511.45	61	348.54	509.34	102	430.54	510.31	143	512.54	512.04
21	268.54	511.37	62	350.54	509.34	103	432.54	510.35	144	514.54	512.18
22	270.54	511.27	63	352.54	509.34	104	434.54	510.38	145	516.54	512.32
23	272.54	511.27	64	354.54	509.34	105	436.54	510.41	146	518.54	513.52
24	274.54	511.27	65	356.54	509.34	106	438.54	510.45	147	520.54	512.66
25	276.54	511.26	66	358.54	509.33	107	440.54	510.48	148	522.54	512.74
26	278.54	511.26	67	360.54	509.32	108	442.54	510.51	149	524.54	512.88
27	280.54	511.26	68	362.54	509.31	109	444.54	510.54	150	526.54	513.02
28	282.54	511.26	69	364.54	509.3	110	446.54	510.56	151	528.54	513.41
29	284.54	511.02	70	366.54	509.29	111	448.54	510.61	152	530.54	513.32
30	286.54	510.78	71	368.54	509.27	112	450.54	510.71	153	532.54	513.41
31	288.54	510.55	72	370.54	509.26	113	452.54	510.8	154	534.54	513.5
32	290.54	510.31	73	372.54	509.26	114	454.54	510.9	155	536.54	513.59
33	292.54	510.07	74	374.54	509.31	115	456.54	511	156	538.54	513.68
34	294.54	509.84	75	376.54	509.35	116	458.54	511.09	157	540.54	513.8
35	296.54	509.6	76	378.54	509.4	117	460.54	511.19	158	592.32	518.17
36	298.54	509.36	77	380.54	509.44	118	462.54	511.06	159	639.5	520.03
37	300.54	509.36	78	382.54	509.49	119	464.54	511.06	160	697.77	520.05
38	302.54	509.35	79	384.54	509.48	120	466.54	511.01	161	757.14	519.54
39	304.54	509.35	80	386.54	509.47	121	468.54	510.96	162	878.64	521.28
40	306.54	509.34	81	388.54	509.46	122	470.54	510.91	163	1006.55	530.48
41	308.54	509.34	82	390.54	509.43	123	472.54	510.86	164	1135.67	535.67

Tabela 50 – Características Geométricas da Seção SF156000 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	524.48	44	621.33	509.59	87	707.33	512.08	130	793.33	511.61
2	11.34	524.46	45	623.33	509.59	88	709.33	512.08	131	795.33	511.6
3	26.63	524.37	46	625.33	509.59	89	711.33	512.08	132	797.33	511.75
4	41.69	524.51	47	627.33	509.59	90	713.33	512.08	133	799.33	512.9
5	100.17	524.54	48	629.33	509.6	91	715.33	512.07	134	801.33	512.04
6	115.03	524.68	49	631.33	509.71	92	717.33	512.07	135	803.33	512.18
7	144.76	524.82	50	633.33	509.89	93	719.33	512.07	136	805.33	512.32
8	190.56	525.02	51	635.33	510.04	94	721.33	512.07	137	807.33	512.31
9	243.44	525.27	52	637.33	510.19	95	723.33	512.06	138	809.33	512.41
10	272.88	525.21	53	639.33	510.34	96	725.33	512.04	139	811.33	512.43
11	306.1	525.09	54	641.33	510.49	97	727.33	512.02	140	813.33	512.49
12	350.75	524.84	55	643.33	510.64	98	729.33	512	141	815.33	512.57
13	391.81	524.13	56	645.33	510.79	99	731.33	511.98	142	817.33	512.58
14	434.9	522.58	57	647.33	510.72	100	733.33	511.96	143	819.33	512.58
15	478.69	519.71	58	649.33	510.65	101	735.33	511.94	144	821.33	512.58
16	554.5	516.5	59	651.33	510.58	102	737.33	511.92	145	823.33	512.58
17	567.91	513.74	60	653.33	510.51	103	739.33	511.9	146	825.33	512.58
18	569.33	513.1	61	655.33	510.44	104	741.33	511.81	147	827.33	512.59
19	571.33	511.6	62	657.33	510.37	105	743.33	511.72	148	829.33	512.59
20	573.33	511.5	63	659.33	510.3	106	745.33	511.64	149	831.33	512.59
21	575.33	511.4	64	661.33	510.3	107	747.33	511.55	150	833.33	512.59
22	577.33	511.3	65	663.33	510.34	108	749.33	511.47	151	835.33	512.59
23	579.33	510.2	66	665.33	510.39	109	751.33	511.38	152	837.33	512.58
24	581.33	510.1	67	667.33	510.44	110	753.33	511.3	153	839.33	512.57
25	583.33	511	68	669.33	510.48	111	755.33	511.21	154	841.33	512.57
26	585.33	510.9	69	671.33	510.53	112	757.33	511.13	155	843.33	512.57
27	587.33	510.7	70	673.33	510.57	113	759.33	511.04	156	845.33	512.57
28	589.33	510.48	71	675.33	510.66	114	761.33	510.96	157	847.33	512.57
29	591.33	510.26	72	677.33	510.75	115	763.33	510.87	158	849.33	512.57
30	593.33	510.04	73	679.33	510.84	116	765.33	510.88	159	851.33	512.57
31	595.33	509.82	74	681.33	510.92	117	767.33	510.92	160	853.33	512.56
32	597.33	509.6	75	683.33	511.01	118	769.33	510.96	161	855.33	512.54
33	599.33	509.6	76	685.33	511.1	119	771.33	511	162	857.33	512.67
34	601.33	509.6	77	687.33	511.19	120	773.33	511.05	163	859.33	513.15
35	603.33	509.6	78	689.33	511.28	121	775.33	511.09	164	861.33	513.74
36	605.33	509.6	79	691.33	511.36	122	777.33	511.13	165	871.11	514.93
37	607.33	509.6	80	693.33	511.48	123	779.33	511.18	166	886.47	516.88
38	609.33	509.6	81	695.33	511.6	124	781.33	511.23	167	903.29	516.51
39	611.33	509.59	82	697.33	511.72	125	783.33	511.28	168	934.92	518.41
40	613.33	509.59	83	699.33	511.84	126	785.33	511.33	169	957.01	520.37
41	615.33	509.59	84	701.33	511.96	127	787.33	511.41	170	965.23	524.1
42	617.33	509.59	85	703.33	512.08	128	789.33	511.47	171	974.28	527.35
43	619.33	509.59	86	705.33	512.08	129	791.33	511.54	-	-	-

Tabela 51 – Características Geométricas da Seção SF153200 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	525.62	48	674.34	508.83	95	768.34	511.88	142	862.34	509.39
2	51.01	524.47	49	676.34	508.8	96	770.34	510.9	143	864.34	509.39
3	105.33	524.63	50	678.34	508.77	97	772.34	510.77	144	866.34	509.39
4	152.65	524.19	51	680.34	508.74	98	774.34	510.63	145	868.34	509.4
5	189.73	523.51	52	682.34	508.69	99	776.34	510.5	146	870.34	509.43
6	244.98	521.85	53	684.34	508.73	100	778.34	510.3	147	872.34	509.46
7	272.23	521.07	54	686.34	508.77	101	780.34	510.36	148	874.34	509.49
8	290.47	520.58	55	688.34	508.81	102	782.34	510.36	149	876.34	509.52
9	312.78	520.07	56	690.34	508.85	103	784.34	510.36	150	878.34	509.53
10	333.17	519.66	57	692.34	508.89	104	786.34	510.36	151	880.34	509.49
11	356.86	519.33	58	694.34	508.91	105	788.34	509.92	152	882.34	509.45
12	379.97	518.93	59	696.34	508.93	106	790.34	509.56	153	884.34	509.41
13	429.6	518.18	60	698.34	508.89	107	792.34	510.01	154	886.34	509.31
14	466.5	516.28	61	700.34	508.84	108	794.34	509.92	155	888.34	509.2
15	487.66	515.69	62	702.34	508.8	109	796.34	509.83	156	890.34	509.1
16	511.86	515.4	63	704.34	508.76	110	798.34	509.74	157	892.34	508.99
17	552.82	516.78	64	706.34	508.72	111	800.34	510.37	158	894.34	508.89
18	583.61	516.5	65	708.34	508.67	112	802.34	510.23	159	896.34	508.91
19	613.77	514.12	66	710.34	508.68	113	804.34	510.08	160	898.34	508.92
20	618.78	512.46	67	712.34	508.69	114	806.34	510.02	161	900.34	508.9
21	620.34	512.42	68	714.34	508.7	115	808.34	509.94	162	902.34	508.85
22	622.34	510.4	69	716.34	508.71	116	810.34	509.81	163	904.34	508.88
23	624.34	510.38	70	718.34	508.72	117	812.34	509.69	164	906.34	508.89
24	626.34	510.24	71	720.34	508.73	118	814.34	509.57	165	908.34	508.9
25	628.34	510.15	72	722.34	508.76	119	816.34	509.45	166	910.34	509
26	630.34	510.09	73	724.34	508.79	120	818.34	509.33	167	912.34	509.1
27	632.34	510.04	74	726.34	508.83	121	820.34	509.2	168	914.34	509.19
28	634.34	509.99	75	728.34	508.85	122	822.34	509.2	169	916.34	509.29
29	636.34	509.94	76	730.34	508.96	123	824.34	509.2	170	918.34	509.38
30	638.34	509.89	77	732.34	509.18	124	826.34	509.19	171	920.34	509.37
31	640.34	509.88	78	734.34	509.28	125	828.34	509.19	172	922.34	509.37
32	642.34	509.71	79	736.34	509.39	126	830.34	509.19	173	924.34	509.37
33	644.34	509.53	80	738.34	509.39	127	832.34	509.32	174	926.34	509.37
34	646.34	509.45	81	740.34	509.38	128	834.34	509.44	175	928.34	509.37
35	648.34	509.36	82	742.34	509.37	129	836.34	509.44	176	930.34	510.42
36	650.34	509.36	83	744.34	509.38	130	838.34	509.43	177	932.34	511.47
37	652.34	509.25	84	746.34	509.62	131	840.34	509.43	178	934.34	512.46
38	654.34	509.14	85	748.34	509.87	132	842.34	509.42	179	938.06	513.62
39	656.34	509.04	86	750.34	510.11	133	844.34	509.42	180	958.3	516.48
40	658.34	508.93	87	752.34	510.12	134	846.34	509.41	181	985.57	516.04
41	660.34	508.91	88	754.34	510.27	135	848.34	509.42	182	1133.03	516.43
42	662.34	508.9	89	756.34	510.42	136	850.34	509.41	183	1287.41	518.33
43	664.34	508.89	90	758.34	510.58	137	852.34	509.4	184	1365.52	520.86
44	666.34	508.88	91	760.34	510.58	138	854.34	509.39	185	1535.76	529.25
45	668.34	508.87	92	762.34	510.9	139	856.34	509.38	-	-	-
46	670.34	508.87	93	764.34	511.23	140	858.34	509.38	-	-	-
47	672.34	508.85	94	766.34	511.56	141	860.34	509.39	-	-	-

Tabela 52 – Características Geométricas da Seção SF148800 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	527.51	45	478.84	505.21	89	566.84	510.31	133	654.84	508.75
2	18.35	526.15	46	480.84	505.32	90	568.84	510.46	134	656.84	508.71
3	57.72	524.09	47	482.84	505.43	91	570.84	510.62	135	658.84	508.76
4	94.58	521.76	48	484.84	505.54	92	572.84	510.78	136	660.84	508.81
5	134.34	519.52	49	486.84	505.85	93	574.84	510.75	137	662.84	508.97
6	158.62	518.53	50	488.84	505.9	94	576.84	510.67	138	664.84	509.18
7	188.92	517.24	51	490.84	506.15	95	578.84	510.57	139	666.84	509.39
8	210.21	516.42	52	492.84	506.41	96	580.84	510.47	140	668.84	509.39
9	235.51	515.4	53	494.84	506.66	97	582.84	510.36	141	670.84	508.84
10	258.26	515.03	54	496.84	507.13	98	584.84	510.29	142	672.84	508.2
11	264.29	514.95	55	498.84	507.34	99	586.84	510.21	143	674.84	509.46
12	269.01	514.95	56	500.84	507.55	100	588.84	510.14	144	676.84	510.07
13	280.58	515.07	57	502.84	507.77	101	590.84	510.06	145	678.84	510.05
14	299.58	514.95	58	504.84	507.98	102	592.84	510.16	146	680.84	509.94
15	325.15	514.94	59	506.84	508.19	103	594.84	510.26	147	682.84	509.81
16	349.61	515.19	60	508.84	508.41	104	596.84	510.46	148	684.84	509.68
17	414.64	514.69	61	510.84	508.32	105	598.84	510.65	149	686.84	509.7
18	425.88	512.02	62	512.84	508.28	106	600.84	510.49	150	688.84	509.79
19	426.84	512.07	63	514.84	508.15	107	602.84	510.34	151	690.84	509.91
20	428.84	511.27	64	516.84	507.03	108	604.84	510.18	152	692.84	509.93
21	430.84	510.45	65	518.84	507.9	109	606.84	510.02	153	694.84	509.95
22	432.84	509.5	66	520.84	507.78	110	608.84	509.86	154	696.84	509.99
23	434.84	509.17	67	522.84	507.65	111	610.84	509.7	155	698.84	510.03
24	436.84	508.66	68	524.84	507.56	112	612.84	509.5	156	700.84	510.07
25	438.84	508.15	69	526.84	507.41	113	614.84	509.29	157	702.84	510.05
26	440.84	507.23	70	528.84	507.17	114	616.84	508.09	158	704.84	510
27	442.84	506.82	71	530.84	506.93	115	618.84	508.89	159	706.84	509.93
28	444.84	506.4	72	532.84	506.69	116	620.84	508.68	160	708.84	509.87
29	446.84	505.99	73	534.84	506.88	117	622.84	508.47	161	710.84	509.85
30	448.84	505.58	74	536.84	507.06	118	624.84	508.46	162	712.84	510.29
31	450.84	505.17	75	538.84	507.24	119	626.84	508.44	163	714.84	510.71
32	452.84	505.17	76	540.84	507.42	120	628.84	508.41	164	716.84	511.14
33	454.84	505.17	77	542.84	507.6	121	630.84	508.39	165	718.84	511.56
34	456.84	505.16	78	544.84	507.99	122	632.84	508.36	166	720.84	512.02
35	458.84	505.16	79	546.84	508.97	123	634.84	508.34	167	723.27	512.48
36	460.84	505.16	80	548.84	508.3	124	636.84	508.32	168	734.32	514.28
37	462.84	505.11	81	550.84	508.46	125	638.84	508.29	169	772.3	516.11
38	464.84	505.07	82	552.84	508.76	126	640.84	508.3	170	831.6	516.19
39	466.84	505.02	83	554.84	509.07	127	642.84	508.33	171	866.12	515.9
40	468.84	504.98	84	556.84	509.38	128	644.84	508.37	172	1041.6	513.76
41	470.84	504.93	85	558.84	509.76	129	646.84	508.4	173	1546.26	528.62
42	472.84	504.82	86	560.84	509.84	130	648.84	508.45	-	-	-
43	474.84	504.99	87	562.84	510	131	650.84	508.55	-	-	-
44	476.84	505.1	88	564.84	510.15	132	652.84	508.66	-	-	-

Tabela 53 – Características Geométricas da Seção SF144800 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	524.25	45	843.65	504.69	89	931.65	505.1
2	89.07	520.02	46	845.65	504.6	90	933.65	505.13
3	97.67	519.43	47	847.65	504.51	91	935.65	505.16
4	209.75	514.9	48	849.65	504.65	92	937.65	505.19
5	298.71	513.98	49	851.65	504.8	93	939.65	505.22
6	418.14	513.69	50	853.65	504.94	94	941.65	505.25
7	482.55	513.64	51	855.65	505.08	95	943.65	505.28
8	513.38	511.92	52	857.65	504.75	96	945.65	505.31
9	554.34	512.55	53	859.65	504.43	97	947.65	505.34
10	591.74	512.59	54	861.65	504.1	98	949.65	505.29
11	655.58	513.56	55	863.65	504.22	99	951.65	505.23
12	710.26	513.26	56	865.65	504.33	100	953.65	505.17
13	768.37	510.51	57	867.65	504.44	101	955.65	505.12
14	782.79	508.13	58	869.65	504.56	102	957.65	505.06
15	783.65	507.84	59	871.65	504.67	103	959.65	505.22
16	785.65	507.55	60	873.65	504.78	104	961.65	505.38
17	787.65	507.38	61	875.65	504.89	105	963.65	505.54
18	789.65	507.22	62	877.65	504.99	106	965.65	505.7
19	791.65	507.06	63	879.65	505.1	107	967.65	505.86
20	793.65	506.89	64	881.65	505	108	969.65	506.03
21	795.65	506.72	65	883.65	504.91	109	971.65	505.95
22	797.65	506.5	66	885.65	504.81	110	973.65	505.87
23	799.65	506.56	67	887.65	504.71	111	975.65	505.79
24	801.65	506.48	68	889.65	504.62	112	977.65	505.71
25	803.65	506.41	69	891.65	504.52	113	979.65	505.64
26	805.65	506.34	70	893.65	504.42	114	981.65	505.56
27	807.65	505.62	71	895.65	504.45	115	983.65	505.88
28	809.65	506	72	897.65	504.75	116	985.65	506.2
29	811.65	505.04	73	899.65	504.5	117	987.65	506.52
30	813.65	505.07	74	901.65	504.53	118	989.65	506.84
31	815.65	505.09	75	903.65	504.56	119	991.65	507.16
32	817.65	505.11	76	905.65	504.56	120	993.65	507.48
33	819.65	505.06	77	907.65	504.59	121	995.65	507.8
34	821.65	505.01	78	909.65	504.66	122	997.65	507.8
35	823.65	505.02	79	911.65	504.74	123	999.65	508.13
36	825.65	505.04	80	913.65	504.81	124	1005.63	509.4
37	827.65	505.06	81	915.65	504.89	125	1031.28	513.19
38	829.65	505.09	82	917.65	504.91	126	1077.17	516.79
39	831.65	505.12	83	919.65	504.94	127	1122.65	518.53
40	833.65	505.14	84	921.65	504.96	128	1149.04	516.96
41	835.65	505.15	85	923.65	504.99	129	1167.24	517.35
42	837.65	505.02	86	925.65	505.01	130	1188.53	522.96
43	839.65	504.9	87	927.65	505.04	-	-	-
44	841.65	504.78	88	929.65	505.07	-	-	-

Tabela 54 – Características Geométricas da Seção SF142200 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	520.51	41	417.91	502.83	81	497.91	504.9	121	577.91	504.84
2	79.47	516	42	419.91	502.91	82	499.91	504.76	122	579.91	504.89
3	116.21	514.7	43	421.91	502.88	83	501.91	504.76	123	581.91	504.94
4	158.82	513.57	44	423.91	502.84	84	503.91	504.75	124	583.91	504.9
5	207.18	512.11	45	425.91	502.8	85	505.91	504.75	125	585.91	504.85
6	234.84	511.9	46	427.91	502.81	86	507.91	504.94	126	587.91	504.8
7	266.77	511.97	47	429.91	502.99	87	509.91	505.13	127	589.91	504.76
8	294.98	512.21	48	431.91	503.17	88	511.91	504.98	128	591.91	504.71
9	320.16	514.7	49	433.91	503.25	89	513.91	504.84	129	593.91	504.67
10	349.55	509.96	50	435.91	503.35	90	515.91	504.9	130	595.91	504.63
11	358.2	507.09	51	437.91	503.28	91	517.91	504.97	131	597.91	504.66
12	359.91	506.66	52	439.91	503.21	92	519.91	505.04	132	599.91	504.7
13	361.91	506.25	53	441.91	503.14	93	521.91	504.03	133	601.91	504.73
14	363.91	505.84	54	443.91	503.1	94	523.91	504.03	134	603.91	504.77
15	365.91	505.01	55	445.91	503.07	95	525.91	505.03	135	605.91	504.81
16	367.91	504.85	56	447.91	503.03	96	527.91	505.3	136	607.91	504.85
17	369.91	504.87	57	449.91	503.03	97	529.91	508.39	137	609.91	504.91
18	371.91	504.52	58	451.91	503.04	98	531.91	505.57	138	611.91	504.97
19	373.91	504.46	59	453.91	503.05	99	533.91	505.56	139	613.91	505.02
20	375.91	504.39	60	455.91	502.9	100	535.91	505.55	140	615.91	505
21	377.91	504.32	61	457.91	502.75	101	537.91	505.55	141	617.91	504.97
22	379.91	504.39	62	459.91	502.65	102	539.91	505.44	142	619.91	504.95
23	381.91	504.46	63	461.91	502.56	103	541.91	505.33	143	621.91	504.8
24	383.91	504.53	64	463.91	502.55	104	543.91	505.29	144	623.91	504.73
25	385.91	504.02	65	465.91	502.54	105	545.91	505.25	145	625.91	504.7
26	387.91	503.5	66	467.91	502.53	106	547.91	505.38	146	627.91	504.68
27	389.91	504.41	67	469.91	502.7	107	549.91	505.51	147	629.91	504.65
28	391.91	504.31	68	471.91	502.87	108	551.91	505.38	148	631.91	504.63
29	393.91	503.22	69	473.91	503.04	109	553.91	505.25	149	633.91	505.46
30	395.91	503.15	70	475.91	503.04	110	555.91	505.13	150	635.91	506.28
31	397.91	503.09	71	477.91	503.04	111	557.91	505.1	151	637.91	507.09
32	399.91	503.09	72	479.91	503.16	112	559.91	505.02	152	641.57	508.7
33	401.91	503.05	73	481.91	503.28	113	561.91	505.06	153	645.98	509.96
34	403.91	503	74	483.91	503.41	114	563.91	505.1	154	665.62	513.51
35	405.91	503.01	75	485.91	503.53	115	565.91	505.15	155	728.59	513.21
36	407.91	502.91	76	487.91	504.12	116	567.91	505.1	156	862.95	512.44
37	409.91	502.91	77	489.91	505.25	117	569.91	505.07	157	978.33	516.49
38	411.91	502.81	78	491.91	505.31	118	571.91	505.05	158	1098.03	525.5
39	413.91	502.78	79	493.91	505.17	119	573.91	506.92	-	-	-
40	415.91	502.75	80	495.91	505.04	120	575.91	504.79	-	-	-

Tabela 55 – Características Geométricas da Seção SF137600 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	523.33	46	464.34	502.68	91	554.34	503.97	136	644.34	503.25
2	37.98	520.67	47	466.34	502.7	92	556.34	504.05	137	646.34	503.36
3	79.22	518.94	48	468.34	502.73	93	558.34	504.13	138	648.34	503.38
4	94.55	518.32	49	470.34	502.75	94	560.34	504.15	139	650.34	503.41
5	111.56	517.54	50	472.34	502.78	95	562.34	504.16	140	652.34	503.43
6	128.54	516.77	51	474.34	502.8	96	564.34	504.17	141	654.34	503.46
7	159.82	515.79	52	476.34	502.82	97	566.34	504.12	142	656.34	503.6
8	179.26	514.53	53	478.34	502.85	98	568.34	504.07	143	658.34	503.74
9	204.31	512.71	54	480.34	502.6	99	570.34	504.02	144	660.34	503.88
10	279.81	512.64	55	482.34	502.36	100	572.34	502	145	662.34	504.02
11	315.72	512.99	56	484.34	502.12	101	574.34	503.97	146	664.34	504.16
12	354.49	513.59	57	486.34	502.53	102	576.34	503.77	147	666.34	505.02
13	392.44	508.97	58	488.34	502.94	103	578.34	503.56	148	668.34	505.88
14	401.02	506.76	59	490.34	503.35	104	580.34	503.36	149	670.34	506.76
15	402.34	506.01	60	492.34	503.28	105	582.34	503.15	150	679.91	508.25
16	404.34	505.25	61	494.34	503.22	106	584.34	503.17	151	704.31	513.9
17	406.34	504.49	62	496.34	503.16	107	586.34	503.19	152	720.35	513
18	408.34	503.9	63	498.34	502.91	108	588.34	503.29	153	774.83	511.32
19	410.34	503.3	64	500.34	502.85	109	590.34	503.38	154	825.55	511.2
20	412.34	503.4	65	502.34	502.75	110	592.34	503.48	155	870.43	510.8
21	414.34	503.35	66	504.34	502.66	111	594.34	503.71	156	907.45	510.59
22	416.34	503.29	67	506.34	502.29	112	596.34	503.47	157	920.45	510.53
23	418.34	503.29	68	508.34	502.52	113	598.34	503.41	158	970.61	510.33
24	420.34	503.24	69	510.34	502.46	114	600.34	503.36	159	970.96	510.44
25	422.34	503.19	70	512.34	502.88	115	602.34	503.38	160	1070.73	510.71
26	424.34	503.19	71	514.34	502.78	116	604.34	503.4	161	1096.42	512.17
27	426.34	503.19	72	516.34	502.64	117	606.34	503.43	162	1170.45	512.1
28	428.34	503.15	73	518.34	502.62	118	608.34	503.45	163	1170.96	512.09
29	430.34	503.11	74	520.34	502.59	119	610.34	503.44	164	1185.98	511.89
30	432.34	503.07	75	522.34	502.56	120	612.34	503.43	165	1200.76	510.93
31	434.34	503.03	76	524.34	502.65	121	614.34	503.42	166	1251.67	509.75
32	436.34	502.98	77	526.34	502.74	122	616.34	503.4	167	1270.83	508.87
33	438.34	502.96	78	528.34	502.83	123	618.34	503.38	168	1318.34	506.74
34	440.34	502.93	79	530.34	502.92	124	620.34	503.36	169	1323.59	505.74
35	442.34	502.9	80	532.34	503.01	125	622.34	503.4	170	1328.61	505.12
36	444.34	502.8	81	534.34	503.1	126	624.34	503.43	171	1333.65	505.13
37	446.34	502.88	82	536.34	503.2	127	626.34	503.39	172	1338.8	505.45
38	448.34	502.86	83	538.34	503.26	128	628.34	503.34	173	1339.34	506.74
39	450.34	502.85	84	540.34	503.33	129	630.34	503.3	174	1370.34	511.13
40	452.34	502.83	85	542.34	503.4	130	632.34	503.25	175	1420.75	511.67
41	454.34	502.82	86	544.34	503.46	131	634.34	503.22	176	1470.56	511.94
42	456.34	502.8	87	546.34	503.64	132	636.34	503.2	177	1520.59	512.21
43	458.34	502.77	88	548.34	503.81	133	638.34	503.17	178	1553.5	520
44	460.34	502.74	89	550.34	503.99	134	640.34	503.15	-	-	-
45	462.34	502.71	90	552.34	503.98	135	642.34	503.2	-	-	-



Tabela 56 – Características Geométricas da Seção SF134000 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	520.55	36	203.67	500.17	71	273.67	500.03	106	343.67	501.87
2	26.13	519.38	37	205.67	500.1	72	275.67	500.02	107	345.67	501.91
3	35.39	518.51	38	207.67	500.02	73	277.67	500.02	108	347.67	501.95
4	56.05	514.86	39	209.67	500.02	74	279.67	500.22	109	349.67	502
5	75.17	511.56	40	211.67	499.94	75	281.67	501.42	110	351.67	502.04
6	94.33	511.65	41	213.67	499.86	76	283.67	500.62	111	353.67	502
7	122.45	512.54	42	215.67	499.85	77	285.67	500.81	112	355.67	501.95
8	144.99	507.38	43	217.67	499.85	78	287.67	501.01	113	357.67	501.9
9	151.15	505.37	44	219.67	499.85	79	289.67	501.02	114	359.67	501.86
10	151.67	505.35	45	221.67	499.84	80	291.67	501.02	115	361.67	501.81
11	153.67	504.68	46	223.67	499.84	81	293.67	501.02	116	363.67	501.88
12	155.67	504.01	47	225.67	499.83	82	295.67	501.02	117	365.67	501.95
13	157.67	503.34	48	227.67	499.94	83	297.67	501.03	118	367.67	502.02
14	159.67	502.67	49	229.67	500.04	84	299.67	501.03	119	369.67	502.09
15	161.67	501.99	50	231.67	500.14	85	301.67	501.03	120	371.67	502.16
16	163.67	501.95	51	233.67	500.24	86	303.67	501.03	121	373.67	502.16
17	165.67	501.91	52	235.67	500.34	87	305.67	501.07	122	375.67	505.15
18	167.67	501.87	53	237.67	500.44	88	307.67	501.09	123	377.67	502.14
19	169.67	501.83	54	239.67	500.41	89	309.67	501.11	124	379.67	502.14
20	171.67	501.68	55	241.67	500.38	90	311.67	501.12	125	381.67	502.2
21	173.67	501.53	56	243.67	500.34	91	313.67	501.17	126	383.67	502.27
22	175.67	501.38	57	245.67	500.31	92	315.67	501.21	127	385.67	502.34
23	177.67	501.23	58	247.67	500.32	93	317.67	501.25	128	387.67	502.5
24	179.67	501.08	59	249.67	500.33	94	319.67	501.29	129	389.67	502.66
25	181.67	500.97	60	251.67	500.33	95	321.67	501.32	130	391.67	502.83
26	183.67	500.86	61	253.67	500.34	96	323.67	501.36	131	393.67	503.68
27	185.67	500.75	62	255.67	500.34	97	325.67	501.42	132	395.67	504.53
28	187.67	500.75	63	257.67	500.28	98	327.67	501.47	133	397.67	505.37
29	189.67	500.64	64	259.67	500.22	99	329.67	501.52	134	438.2	511.76
30	191.67	500.54	65	261.67	500.16	100	331.67	501.57	135	495.02	510.95
31	193.67	500.48	66	263.67	500.1	101	333.67	501.63	136	568.37	509.68
32	195.67	500.42	67	265.67	500.04	102	335.67	501.68	137	699.29	510.88
33	197.67	500.36	68	267.67	500.04	103	337.67	501.73	138	800.01	510.34
34	199.67	500.31	69	269.67	500.03	104	339.67	501.78	139	909.31	512.87
35	201.67	500.25	70	271.67	500.03	105	341.67	501.82	140	1010.32	517.92

Tabela 57 – Características Geométricas da Seção SF130300 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	519.99	39	496.71	501.55	77	572.71	502.5	115	648.71	502.82
2	64.09	515.04	40	498.71	501.77	78	574.71	502.53	116	650.71	502.8
3	129.94	511.21	41	500.71	501.99	79	576.71	502.56	117	652.71	502.82
4	180.31	509.65	42	502.71	501.91	80	578.71	502.61	118	654.71	502.84
5	243.69	509.06	43	504.71	501.84	81	580.71	502.67	119	656.71	502.86
6	301.33	509.62	44	506.71	501.76	82	582.71	502.72	120	658.71	502.78
7	367.37	509.88	45	508.71	501.69	83	584.71	502.77	121	660.71	502.7
8	408.3	510.54	46	510.71	501.73	84	586.71	502.77	122	662.71	502.62
9	429.19	507.92	47	512.71	501.77	85	588.71	502.77	123	664.71	502.55
10	439.84	504.88	48	514.71	501.81	86	590.71	502.77	124	666.71	502.55
11	440.71	504.56	49	516.71	501.88	87	592.71	502.84	125	668.71	502.55
12	442.71	504.21	50	518.71	501.94	88	594.71	502.91	126	670.71	502.55
13	444.71	503.51	51	520.71	502.01	89	596.71	502.99	127	672.71	502.56
14	446.71	503.16	52	522.71	502.07	90	598.71	503.06	128	674.71	502.6
15	448.71	502.81	53	524.71	502.13	91	600.71	503.04	129	676.71	502.63
16	450.71	502.63	54	526.71	502.18	92	602.71	503.03	130	678.71	502.67
17	452.71	502.46	55	528.71	502.23	93	604.71	503.01	131	680.71	502.71
18	454.71	502.12	56	530.71	502.28	94	606.71	502.99	132	682.71	502.91
19	456.71	501.81	57	532.71	502.28	95	608.71	502.95	133	684.71	503.11
20	458.71	501.5	58	534.71	502.28	96	610.71	502.92	134	686.71	503.31
21	460.71	501.27	59	536.71	502.28	97	612.71	502.88	135	688.71	502.3
22	462.71	501.03	60	538.71	502.29	98	614.71	502.85	136	690.71	503.29
23	464.71	500.8	61	540.71	502.28	99	616.71	502.87	137	692.71	503.29
24	466.71	500.63	62	542.71	502.27	100	618.71	502.9	138	694.71	503.29
25	468.71	500.45	63	544.71	502.27	101	620.71	502.92	139	696.71	503.28
26	470.71	500.28	64	546.71	502.26	102	622.71	502.94	140	698.71	503.67
27	472.71	500.29	65	548.71	502.29	103	624.71	503.01	141	700.71	504.06
28	474.71	500.29	66	550.71	502.33	104	626.71	503.08	142	702.71	504.45
29	476.71	500.29	67	552.71	502.36	105	628.71	503.27	143	704.71	504.88
30	478.71	500.31	68	554.71	502.41	106	630.71	503.22	144	715.65	507.02
31	480.71	500.36	69	556.71	502.46	107	632.71	503.17	145	721.23	508.53
32	482.71	500.4	70	558.71	502.52	108	634.71	503.12	146	726.86	510.57
33	484.71	500.46	71	560.71	502.57	109	636.71	503.07	147	764.98	510.79
34	486.71	500.38	72	562.71	502.54	110	638.71	503	148	820.34	510.15
35	488.71	500.31	73	564.71	502.51	111	640.71	502.94	149	970.23	510.03
36	490.71	500.65	74	566.71	502.48	112	642.71	502.87	150	1110.15	521
37	492.71	500.99	75	568.71	502.45	113	644.71	502.85	-	-	-
38	494.71	501.33	76	570.71	502.47	114	646.71	502.84	-	-	-

Tabela 58 – Características Geométricas da Seção SF127210 do Rio São Francisco - Parte I

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	521.73	37	1084	503.81	73	1162	501.81
2	83	520.54	38	1086	504.14	74	1164	501.8
3	195	520.11	39	1092	506.71	75	1166	501.76
4	299	519.83	40	1095	507.94	76	1168	501.72
5	337	518.95	41	1098	507.88	77	1170	501.71
6	355	518.92	42	1102	505.36	78	1172	501.75
7	400	517.28	43	1103	504.22	79	1174	501.78
8	445	514.88	44	1103.66	504.24	80	1176	501.81
9	487	512.53	45	1106	504.22	81	1178	501.74
10	547	510.74	46	1108	504.19	82	1180	501.66
11	558	510.85	47	1110	503.79	83	1182	501.6
12	607	510.75	48	1112	503.28	84	1184	501.61
13	658	510.86	49	1114	502.8	85	1186	501.62
14	708	511.59	50	1116	502.31	86	1188	501.63
15	759	511.79	51	1118	501.83	87	1190	501.58
16	810	511.44	52	1120	501.97	88	1192	501.5
17	860	511.77	53	1122	502.1	89	1194	501.43
18	910	504.24	54	1124	502.17	90	1196	501.36
19	915	502.29	55	1126	502.19	91	1198	501.28
20	921	502.02	56	1128	502.24	92	1200	501.19
21	927	502.13	57	1130	502.29	93	1202	501.06
22	934	502.07	58	1132	502.35	94	1204	500.88
23	944	501.76	59	1134	502.22	95	1206	500.81
24	953	501.9	60	1136	502.08	96	1208	500.75
25	964	502.39	61	1138	501.87	97	1210	500.69
26	971	502.45	62	1140	501.68	98	1212	500.64
27	978	504.24	63	1142	501.71	99	1214	500.65
28	983	504.24	64	1144	501.74	100	1216	500.67
29	995	504.33	65	1146	501.67	101	1218	500.68
30	1005	504.38	66	1148	501.63	102	1220	500.69
31	1020	504.34	67	1150	501.66	103	1222	500.7
32	1035	504	68	1152	501.68	104	1224	500.72
33	1058	504.14	69	1154	501.71	105	1226	500.73
34	1066	503.78	70	1156	501.75	106	1228	500.74
35	1073	503.9	71	1158	501.79	107	1230	500.76
36	1079	503.74	72	1160	501.81	108	1232	500.73

Tabela 59 – Características Geométricas da Seção SF127210 do Rio São Francisco - Parte II

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
109	1234	500.61	144	1304	502.44	179	1374	503.39
110	1236	500.5	145	1306	502.64	180	1376	503.37
111	1238	500.39	146	1308	502.93	181	1378	503.32
112	1240	500.28	147	1310	503	182	1380	503.26
113	1242	500.17	148	1312	502.7	183	1382	503.2
114	1244	500.06	149	1314	502.39	184	1384	503.23
115	1246	499.95	150	1316	502.45	185	1386	503.29
116	1248	499.85	151	1318	502.52	186	1388	503.36
117	1250	499.86	152	1320	502.58	187	1390	503.43
118	1252	499.87	153	1322	502.64	188	1392	503.4
119	1254	499.88	154	1324	502.71	189	1394	503.38
120	1256	499.89	155	1326	502.8	190	1396	503.35
121	1258	499.91	156	1328	502.89	191	1398	503.34
122	1260	499.92	157	1330	502.98	192	1400	503.41
123	1262	499.93	158	1332	503.07	193	1402	503.47
124	1264	500.03	159	1334	503.09	194	1404	503.54
125	1266	500.23	160	1336	503.05	195	1406	503.44
126	1268	500.42	161	1338	503.02	196	1408	503.35
127	1270	500.61	162	1340	502.98	197	1410	503.25
128	1272	500.61	163	1342	502.95	198	1412	503.17
129	1274	500.61	164	1344	502.96	199	1414	503.53
130	1276	500.71	165	1346	503.03	200	1416	503.89
131	1278	500.97	166	1348	503.1	201	1418	504.22
132	1280	501.21	167	1350	503.17	202	1425.35	505.5
133	1282	501.45	168	1352	503.22	203	1436.79	506.55
134	1284	501.62	169	1354	503.26	204	1445.52	507.71
135	1286	501.68	170	1356	503.3	205	1452.59	510.11
136	1288	501.73	171	1358	503.34	206	1458.47	512.59
137	1290	501.78	172	1360	503.35	207	1461.49	514.62
138	1292	501.83	173	1362	503.35	208	1469.13	516.5
139	1294	501.99	174	1364	503.34	209	1476.32	518.11
140	1296	502.2	175	1366	503.34	210	1485.27	519.96
141	1298	502.4	176	1368	503.35	211	1494.31	521.77
142	1300	502.59	177	1370	503.36	-	-	-
143	1302	502.71	178	1372	503.38	-	-	-

Tabela 60 – Características Geométricas da Seção SF127190 do Rio São Francisco - Parte I

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	521.73	37	1084	503.81	73	1162	501.81
2	83	520.54	38	1086	504.14	74	1164	501.8
3	195	520.11	39	1092	506.71	75	1166	501.76
4	299	519.83	40	1095	507.94	76	1168	501.72
5	337	518.95	41	1098	507.88	77	1170	501.71
6	355	518.92	42	1102	505.36	78	1172	501.75
7	400	517.28	43	1103	504.22	79	1174	501.78
8	445	514.88	44	1103.66	504.24	80	1176	501.81
9	487	512.53	45	1106	504.22	81	1178	501.74
10	547	510.74	46	1108	504.19	82	1180	501.66
11	558	510.85	47	1110	503.79	83	1182	501.6
12	607	510.75	48	1112	503.28	84	1184	501.61
13	658	510.86	49	1114	502.8	85	1186	501.62
14	708	511.59	50	1116	502.31	86	1188	501.63
15	759	511.79	51	1118	501.83	87	1190	501.58
16	810	511.44	52	1120	501.97	88	1192	501.5
17	860	511.77	53	1122	502.1	89	1194	501.43
18	910	504.24	54	1124	502.17	90	1196	501.36
19	915	502.29	55	1126	502.19	91	1198	501.28
20	921	502.02	56	1128	502.24	92	1200	501.19
21	927	502.13	57	1130	502.29	93	1202	501.06
22	934	502.07	58	1132	502.35	94	1204	500.88
23	944	501.76	59	1134	502.22	95	1206	500.81
24	953	501.9	60	1136	502.08	96	1208	500.75
25	964	502.39	61	1138	501.87	97	1210	500.69
26	971	502.45	62	1140	501.68	98	1212	500.64
27	978	504.24	63	1142	501.71	99	1214	500.65
28	983	504.24	64	1144	501.74	100	1216	500.67
29	995	504.33	65	1146	501.67	101	1218	500.68
30	1005	504.38	66	1148	501.63	102	1220	500.69
31	1020	504.34	67	1150	501.66	103	1222	500.7
32	1035	504	68	1152	501.68	104	1224	500.72
33	1058	504.14	69	1154	501.71	105	1226	500.73
34	1066	503.78	70	1156	501.75	106	1228	500.74
35	1073	503.9	71	1158	501.79	107	1230	500.76
36	1079	503.74	72	1160	501.81	108	1232	500.73

Tabela 61 – Características Geométricas da Seção SF127190 do Rio São Francisco - Parte II

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
109	1234	500.61	144	1304	502.44	179	1374	503.39
110	1236	500.5	145	1306	502.64	180	1376	503.37
111	1238	500.39	146	1308	502.93	181	1378	503.32
112	1240	500.28	147	1310	503	182	1380	503.26
113	1242	500.17	148	1312	502.7	183	1382	503.2
114	1244	500.06	149	1314	502.39	184	1384	503.23
115	1246	499.95	150	1316	502.45	185	1386	503.29
116	1248	499.85	151	1318	502.52	186	1388	503.36
117	1250	499.86	152	1320	502.58	187	1390	503.43
118	1252	499.87	153	1322	502.64	188	1392	503.4
119	1254	499.88	154	1324	502.71	189	1394	503.38
120	1256	499.89	155	1326	502.8	190	1396	503.35
121	1258	499.91	156	1328	502.89	191	1398	503.34
122	1260	499.92	157	1330	502.98	192	1400	503.41
123	1262	499.93	158	1332	503.07	193	1402	503.47
124	1264	500.03	159	1334	503.09	194	1404	503.54
125	1266	500.23	160	1336	503.05	195	1406	503.44
126	1268	500.42	161	1338	503.02	196	1408	503.35
127	1270	500.61	162	1340	502.98	197	1410	503.25
128	1272	500.61	163	1342	502.95	198	1412	503.17
129	1274	500.61	164	1344	502.96	199	1414	503.53
130	1276	500.71	165	1346	503.03	200	1416	503.89
131	1278	500.97	166	1348	503.1	201	1418	504.22
132	1280	501.21	167	1350	503.17	202	1425.35	505.5
133	1282	501.45	168	1352	503.22	203	1436.79	506.55
134	1284	501.62	169	1354	503.26	204	1445.52	507.71
135	1286	501.68	170	1356	503.3	205	1452.59	510.11
136	1288	501.73	171	1358	503.34	206	1458.47	512.59
137	1290	501.78	172	1360	503.35	207	1461.49	514.62
138	1292	501.83	173	1362	503.35	208	1469.13	516.5
139	1294	501.99	174	1364	503.34	209	1476.32	518.11
140	1296	502.2	175	1366	503.34	210	1485.27	519.96
141	1298	502.4	176	1368	503.35	211	1494.31	521.77
142	1300	502.59	177	1370	503.36	-	-	-
143	1302	502.71	178	1372	503.38	-	-	-

Tabela 62 – Características Geométricas da Seção SF122100 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	523.83	43	619	501.21	85	703	499.24	127	787	498.71
2	3	523.23	44	621	501.22	86	705	499.18	128	789	498.9
3	8	523.73	45	623	501.24	87	707	499.12	129	791	499.05
4	69	521.15	46	625	501.26	88	709	499.06	130	793	499.19
5	109	519.02	47	627	501.29	89	711	499	131	795	499.33
6	160	515.94	48	629	501.31	90	713	498.94	132	797	499.47
7	210	512.43	49	631	501.34	91	715	498.88	133	799	499.61
8	261	509.27	50	633	501.36	92	717	498.82	134	801	499.63
9	311	508.31	51	635	501.38	93	719	498.76	135	803	499.65
10	362	508.72	52	637	501.4	94	721	498.7	136	805	499.67
11	412	508.26	53	639	501.42	95	723	498.64	137	807	499.68
12	462	510.74	54	641	501.44	96	725	498.58	138	809	499.7
13	512	511.15	55	643	501.38	97	727	498.53	139	811	499.72
14	561.28	503.6	56	645	501.3	98	729	498.51	140	813	499.83
15	562	503.59	57	647	501.23	99	731	498.48	141	815	499.98
16	565	502.09	58	649	501.16	100	733	498.46	142	817	500.14
17	567	501.51	59	651	501.11	101	735	498.44	143	819	500.3
18	569	501.3	60	653	501.08	102	737	498.42	144	821	500.52
19	571	501.25	61	655	501.04	103	739	498.33	145	823	500.89
20	573	501.3	62	657	501.01	104	741	498.23	146	825	501.27
21	575	501.35	63	659	500.98	105	743	498.12	147	827	501.65
22	577	501.4	64	661	500.92	106	745	498.02	148	829	502.14
23	579	501.33	65	663	500.82	107	747	497.92	149	831	502.9
24	581	501.13	66	665	500.72	108	749	497.94	150	833	503.59
25	583	500.94	67	667	500.61	109	751	497.97	151	838.67	506.17
26	585	500.98	68	669	500.51	110	753	498	152	843.38	507.86
27	587	501.01	69	671	500.41	111	755	498.03	153	852.59	509.27
28	589	501.05	70	673	500.32	112	757	498.07	154	863.05	509.27
29	591	501.07	71	675	500.24	113	759	498.1	155	876.92	509.88
30	593	501.07	72	677	500.15	114	761	498.15	156	888.18	510.31
31	595	501.06	73	679	500.07	115	763	498.21	157	896.31	510.69
32	597	501.05	74	681	499.98	116	765	498.27	158	905.98	511.15
33	599	501.04	75	683	499.91	117	767	498.34	159	917.85	512.06
34	601	501.07	76	685	499.84	118	769	498.4	160	933.87	513.11
35	603	501.1	77	687	499.77	119	771	498.33	161	940.93	513.61
36	605	501.14	78	689	499.7	120	773	498.23	162	947.34	514.1
37	607	501.14	79	691	499.63	121	775	498.14	163	956.11	514.85
38	609	501.14	80	693	499.56	122	777	498.05	164	977.9	516.99
39	611	501.14	81	695	499.5	123	779	497.96	165	983	517.66
40	613	501.16	82	697	499.43	124	781	498.13	166	998	519.13
41	615	501.17	83	699	499.37	125	783	498.32	-	-	-
42	617	501.19	84	701	499.31	126	785	498.52	-	-	-

Tabela 63 – Características Geométricas da Seção SF118800 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	515.76	45	1091	496.88	89	1179	497.36
2	19	514.69	46	1093	496.88	90	1181	497.23
3	66	512.93	47	1095	496.84	91	1183	497.11
4	119	510.92	48	1097	496.78	92	1185	496.99
5	169	508.04	49	1099	496.73	93	1187	496.87
6	219	507.06	50	1101	496.68	94	1189	496.75
7	279	506.79	51	1103	496.68	95	1191	496.62
8	319	507.06	52	1105	496.68	96	1193	496.5
9	379	506.75	53	1107	496.68	97	1195	496.38
10	441	506.57	54	1109	496.67	98	1197	496.22
11	503	506.81	55	1111	496.63	99	1199	496.06
12	558	505.81	56	1113	496.6	100	1201	495.91
13	603	505.12	57	1115	496.41	101	1203	495.89
14	658	507.14	58	1117	496.19	102	1205	495.89
15	703	507.29	59	1119	496.14	103	1207	495.88
16	758	506.52	60	1121	496.37	104	1209	495.88
17	818	507.09	61	1123	496.88	105	1211	495.87
18	868	506.43	62	1125	496.8	106	1213	495.86
19	923	508.25	63	1127	496.73	107	1215	496.18
20	983	506.02	64	1129	496.42	108	1217	496.49
21	1043	501.38	65	1131	497.04	109	1219	496.75
22	1045	501.12	66	1133	497.71	110	1221	497.02
23	1047	500.92	67	1135	497.56	111	1223	497.29
24	1049	499.77	68	1137	497.12	112	1225	497.55
25	1051	498.04	69	1139	496.68	113	1227	497.82
26	1053	497.68	70	1141	496.46	114	1229	498.07
27	1055	497.47	71	1143	496.69	115	1231	498.31
28	1057	497.33	72	1145	496.91	116	1233	498.55
29	1059	497.31	73	1147	496.91	117	1235	498.8
30	1061	497.38	74	1149	496.91	118	1237	499.22
31	1063	497.44	75	1151	496.91	119	1239	499.69
32	1065	497.32	76	1153	496.9	120	1241	500.23
33	1067	496.93	77	1155	497	121	1243	500.81
34	1069	497.75	78	1157	497.13	122	1245	501.38
35	1071	497.56	79	1159	497.27	123	1252.71	505.22
36	1073	497.3	80	1161	497.4	124	1258.12	506.65
37	1075	497.05	81	1163	497.53	125	1275.21	508.89
38	1077	496.84	82	1165	497.66	126	1290.56	511.05
39	1079	496.74	83	1167	497.79	127	1322.12	512.91
40	1081	496.65	84	1169	497.92	128	1340.37	514.42
41	1083	496.62	85	1171	497.84	129	1355.11	515.81
42	1085	496.73	86	1173	497.72	130	1370.21	517.11
43	1087	496.84	87	1175	497.6	131	1378	517.63
44	1089	496.88	88	1177	497.48	-	-	-



Tabela 64 – Características Geométricas da Seção SF116400 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	512.2	47	1212.96	495.48	93	1304.96	495.16
2	55.05	510.52	48	1214.96	495.59	94	1306.96	495.21
3	118.94	510.21	49	1216.96	495.19	95	1308.96	495.31
4	190	510.31	50	1218.96	495.69	96	1310.96	495.36
5	248.09	509.95	51	1220.96	495.55	97	1312.96	495.56
6	311.31	507.87	52	1222.96	495.41	98	1314.96	495.56
7	383.27	506.62	53	1224.96	495.4	99	1316.96	496.16
8	446.07	506.36	54	1226.96	495.38	100	1318.96	496.36
9	518.25	505.32	55	1228.96	494.9	101	1320.96	496.52
10	565.59	504.25	56	1230.96	494.8	102	1322.96	496.69
11	599.4	504.33	57	1232.96	494.7	103	1324.96	496.86
12	644.77	504.92	58	1234.96	494.6	104	1326.96	497.02
13	691.26	504.87	59	1236.96	494.52	105	1328.96	497.19
14	721	503.44	60	1238.96	495.59	106	1330.96	497.36
15	754.06	500.16	61	1240.96	494.52	107	1332.96	497.02
16	813.02	503.35	62	1242.96	494.44	108	1334.96	496.69
17	851.43	503.7	63	1244.96	494.37	109	1336.96	496.35
18	894.28	505.19	64	1246.96	494.21	110	1338.96	496.02
19	932.7	505.13	65	1248.96	494.21	111	1340.96	495.68
20	971.22	505.36	66	1250.96	493.89	112	1342.96	495.35
21	1000.69	505.35	67	1252.96	493.98	113	1344.96	495.34
22	1022.52	504.68	68	1254.96	494.08	114	1346.96	495.34
23	1049.11	504.62	69	1256.96	494.17	115	1348.96	495.34
24	1096.12	505.58	70	1258.96	494.28	116	1350.96	495.34
25	1127.49	505.24	71	1260.96	494.39	117	1352.96	495.34
26	1152.62	503.19	72	1262.96	494.58	118	1354.96	495.33
27	1172.96	499.98	73	1264.96	494.98	119	1356.96	495.44
28	1174.96	498.95	74	1266.96	495.37	120	1358.96	495.55
29	1176.96	498.42	75	1268.96	495.33	121	1360.96	495.65
30	1178.96	497.89	76	1270.96	495.29	122	1362.96	495.76
31	1180.96	497.35	77	1272.96	495.25	123	1364.96	495.87
32	1182.96	496.95	78	1274.96	495.22	124	1366.96	495.97
33	1184.96	496.55	79	1276.96	495.18	125	1368.96	496.39
34	1186.96	496.15	80	1278.96	495.22	126	1370.96	496.81
35	1188.96	496.16	81	1280.96	495.26	127	1372.96	497.24
36	1190.96	496.17	82	1282.96	495.3	128	1374.96	497.65
37	1192.96	496.18	83	1284.96	495.34	129	1376.96	498.42
38	1194.96	496.09	84	1286.96	495.38	130	1378.96	499.98
39	1196.96	496.01	85	1288.96	495.42	131	1394.49	503.43
40	1198.96	495.95	86	1290.96	495.46	132	1423.58	506.85
41	1200.96	495.75	87	1292.96	495.5	133	1455.84	506.13
42	1202.96	495.89	88	1294.96	495.54	134	1482.89	507.08
43	1204.96	495.9	89	1296.96	495.58	135	1511.21	508.38
44	1206.96	495.9	90	1298.96	495.48	136	1575.43	512.18
45	1208.96	495.64	91	1300.96	495.38	137	1630.6	516.01
46	1210.96	495.37	92	1302.96	495.27	-	-	-

Tabela 65 – Características Geométricas da Seção SF111700 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	513.61	47	998.22	495.36	93	1090.22	496.68	139	1182.22	496.27
2	25.06	513.18	48	1000.22	495.36	94	1092.22	496.65	140	1184.22	496.15
3	51.27	512.66	49	1002.22	495.36	95	1094.22	496.62	141	1186.22	496.03
4	63.04	512.55	50	1004.22	495.37	96	1096.22	496.59	142	1188.22	495.93
5	74.83	512.3	51	1006.22	495.26	97	1098.22	496.56	143	1190.22	495.95
6	86.24	512.19	52	1008.22	495.15	98	1100.22	496.55	144	1192.22	495.97
7	115.6	511.65	53	1010.22	495.04	99	1102.22	496.55	145	1194.22	496.99
8	145.81	511.24	54	1012.22	494.93	100	1104.22	496.55	146	1196.22	496.01
9	175.5	510.99	55	1014.22	494.83	101	1106.22	496.55	147	1198.22	496.03
10	201.7	510.61	56	1016.22	494.93	102	1108.22	496.54	148	1200.22	496.05
11	225.55	510.33	57	1018.22	495.02	103	1110.22	496.54	149	1202.22	496.07
12	238.59	510.18	58	1020.22	495.11	104	1112.22	496.58	150	1204.22	496.09
13	266.22	509.62	59	1022.22	495.21	105	1114.22	496.42	151	1206.22	496.11
14	304.68	509.35	60	1024.22	495.3	106	1116.22	496.66	152	1208.22	496.13
15	342.97	509.19	61	1026.22	495.4	107	1118.22	496.7	153	1210.22	496.22
16	356.82	509.08	62	1028.22	495.49	108	1120.22	496.73	154	1212.22	496.3
17	370.89	508.62	63	1030.22	495.56	109	1122.22	496.77	155	1214.22	496.39
18	410.73	508.18	64	1032.22	495.63	110	1124.22	496.81	156	1216.22	496.47
19	436.72	508.18	65	1034.22	495.7	111	1126.22	496.85	157	1218.22	496.56
20	448.47	507.92	66	1036.22	495.77	112	1128.22	496.87	158	1220.22	496.64
21	460.57	507.43	67	1038.22	495.84	113	1130.22	496.89	159	1222.22	496.76
22	493.73	507.09	68	1040.22	495.91	114	1132.22	496.91	160	1224.22	496.87
23	521.37	506.53	69	1042.22	496.13	115	1134.22	496.93	161	1226.22	496.99
24	563.49	506.05	70	1044.22	496.36	116	1136.22	496.95	162	1228.22	497.1
25	605.12	504.32	71	1046.22	496.58	117	1138.22	496.97	163	1230.22	497.12
26	642.38	503.93	72	1048.22	496.81	118	1140.22	497.98	164	1232.22	497.22
27	666.56	503.55	73	1050.22	497.04	119	1142.22	497	165	1234.22	497.32
28	698.46	503.4	74	1052.22	496.97	120	1144.22	497.03	166	1236.22	497.41
29	725.83	503.9	75	1054.22	496.7	121	1146.22	497.03	167	1238.22	497.51
30	770.52	504.24	76	1056.22	496.84	122	1148.22	497.04	168	1240.22	497.61
31	796.88	505.01	77	1058.22	496.77	123	1150.22	497.05	169	1242.22	497.6
32	827.2	505.33	78	1060.22	496.71	124	1152.22	497.05	170	1244.22	497.59
33	859.23	506.81	79	1062.22	496.64	125	1154.22	497.06	171	1246.22	497.57
34	886.28	506.85	80	1064.22	496.58	126	1156.22	497.07	172	1248.22	497.72
35	914.98	506.89	81	1066.22	496.54	127	1158.22	497.75	173	1250.22	497.87
36	964.01	501.39	82	1068.22	496.5	128	1160.22	497.08	174	1252.22	498.02
37	978.38	498.15	83	1070.22	496.46	129	1162.22	497.09	175	1254.22	498.15
38	980.22	497.67	84	1072.22	496.42	130	1164.22	497.1	176	1262.22	500.95
39	982.22	497.21	85	1074.22	496.38	131	1166.22	497.1	177	1281.17	504.18
40	984.22	496.74	86	1076.22	496.34	132	1168.22	497.11	178	1306.62	507.54
41	986.22	496.28	87	1078.22	496.45	133	1170.22	496.99	179	1326.56	510.45
42	988.22	495.81	88	1080.22	496.56	134	1172.22	496.87	180	1334.13	511.29
43	990.22	495.35	89	1082.22	496.66	135	1174.22	496.75	181	1342.29	512.07
44	992.22	495.35	90	1084.22	496.77	136	1176.22	496.63	182	1357.78	513.88
45	994.22	495.35	91	1086.22	496.74	137	1178.22	496.51	-	-	-
46	996.22	495.35	92	1088.22	496.71	138	1180.22	496.39	-	-	-

Tabela 66 – Características Geométricas da Seção SF109400 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	514	47	1246	496.1	93	1338	494.81	139	1430	494.23
2	234.83	506.38	48	1248	496.08	94	1340	494.82	140	1432	494.19
3	260.91	506.35	49	1250	496.07	95	1342	494.86	141	1434	494.1
4	285.19	506.33	50	1252	496.07	96	1344	494.88	142	1436	493.88
5	307.67	506.39	51	1254	496	97	1346	494.9	143	1438	493.83
6	335.3	506.41	52	1256	496.06	98	1348	494.91	144	1440	493.97
7	350.4	506.34	53	1258	496.06	99	1350	494.93	145	1442	494.01
8	376.63	506.35	54	1260	496.05	100	1352	494.96	146	1444	494.03
9	406.08	506.39	55	1262	496.04	101	1354	494.98	147	1446	493.97
10	431.54	506.4	56	1264	496.03	102	1356	494.99	148	1448	493.72
11	444.26	506.4	57	1266	496.01	103	1358	495	149	1450	493.52
12	457.24	506.48	58	1268	496	104	1360	495	150	1452	493.42
13	470.04	506.44	59	1270	495.99	105	1362	495	151	1454	493.46
14	482.68	506.54	60	1272	495.96	106	1364	494.81	152	1456	493.51
15	493.81	506.89	61	1274	495.93	107	1366	494.62	153	1458	493.53
16	515.36	506.97	62	1276	495.9	108	1368	493.99	154	1460	494.12
17	518.39	507.26	63	1278	495.81	109	1370	493.61	155	1462	494.32
18	529.71	507.36	64	1280	495.81	110	1372	494.72	156	1464	494.03
19	551.22	507.53	65	1282	495.88	111	1374	494.96	157	1466	494.31
20	576.89	507.56	66	1284	495.89	112	1376	495.12	158	1468	494.25
21	589.56	507.42	67	1286	495.79	113	1378	495.1	159	1470	494.22
22	613.89	507.08	68	1288	495.67	114	1380	494.99	160	1472	494.21
23	627.39	506.85	69	1290	495.66	115	1382	494.91	161	1474	494.2
24	655.44	506.27	70	1292	495.64	116	1384	494.72	162	1476	494.12
25	665.83	505.6	71	1294	495.6	117	1386	494.59	163	1478	494.32
26	690.63	505.37	72	1296	495.39	118	1388	494.24	164	1480	494.67
27	702.1	505.37	73	1298	495.26	119	1390	493.93	165	1482	494.76
28	716.72	505.19	74	1300	495.36	120	1392	493.83	166	1484	494.99
29	734.5	504.96	75	1302	495.21	121	1394	494.54	167	1486	494.99
30	748.83	505.05	76	1304	495.08	122	1396	494.63	168	1488	495.33
31	761.3	504.97	77	1306	494.99	123	1398	494.56	169	1490	495.74
32	774.35	504.82	78	1308	494.71	124	1400	494.52	170	1492	495.81
33	799.58	504.95	79	1310	494.58	125	1402	494.51	171	1494	495.91
34	828.31	504.99	80	1312	494.69	126	1404	494.41	172	1496	496.33
35	865.11	505.31	81	1314	494.7	127	1406	494.4	173	1498	497
36	903.5	505.43	82	1316	494.72	128	1408	494.35	174	1500	497.02
37	931.37	505.42	83	1318	494.8	129	1410	494.32	175	1512.57	501.6
38	964.98	505.57	84	1320	494.82	130	1412	494.3	176	1557.78	504.59
39	1002.23	505.72	85	1322	494.81	131	1414	494.23	177	1609.53	504.49
40	1046.53	505.89	86	1324	494.74	132	1416	494.27	178	1678.59	503.69
41	1120.12	504.75	87	1326	494.71	133	1418	494.3	179	1741.67	503.85
42	1168.08	504.78	88	1328	494.69	134	1420	494.3	180	1858.92	502.92
43	1214.06	502.11	89	1330	494.72	135	1422	494.32	181	2067.63	513.81
44	1241.37	497.02	90	1332	494.74	136	1424	494.31	-	-	-
45	1242	496.97	91	1334	494.79	137	1426	494.29	-	-	-
46	1244	497.24	92	1336	494.8	138	1428	494.25	-	-	-

Tabela 67 – Características Geométricas da Seção SF102500 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	512.86	41	700	493.95	81	780	493.26	121	860	495.18
2	40	511.64	42	702	493.88	82	782	493.52	122	862	495.25
3	60	511.1	43	704	493.8	83	784	493.77	123	864	495.25
4	95	509.7	44	706	493.73	84	786	494.03	124	866	495.25
5	120	508.74	45	708	493.65	85	788	494.04	125	868	495.25
6	155	507.28	46	710	493.58	86	790	493.96	126	870	495.33
7	175	506.44	47	712	493.51	87	792	493.89	127	872	495.42
8	210	505.67	48	714	493.43	88	794	493.82	128	874	495.52
9	245	504.51	49	716	493.36	89	796	493.74	129	876	495.61
10	275	503.68	50	718	493.32	90	798	493.67	130	878	495.62
11	315	502.66	51	720	493.3	91	800	493.59	131	880	495.54
12	340	502.29	52	722	493.28	92	802	493.65	132	882	495.46
13	375	501.94	53	724	493.27	93	804	493.84	133	884	495.39
14	400	501.63	54	726	493.25	94	806	494.03	134	886	495.42
15	435	501.59	55	728	493.23	95	808	494.22	135	888	495.49
16	460	501.65	56	730	493.22	96	810	494.26	136	890	495.56
17	485	501.97	57	732	493.2	97	812	494.29	137	892	495.59
18	515	501.84	58	734	493.19	98	814	494.31	138	894	495.62
19	555	501.87	59	736	493.17	99	816	494.34	139	896	495.64
20	580	502.5	60	738	493.15	100	818	494.27	140	898	495.63
21	615	503.59	61	740	493.14	101	820	494.2	141	900	495.61
22	645	500.64	62	742	493.07	102	822	494.12	142	902	495.59
23	665	496.76	63	744	492.99	103	824	494.08	143	904	495.8
24	666	496.5	64	746	492.9	104	826	494.15	144	906	496.22
25	668	495.67	65	748	492.82	105	828	494.22	145	908	496.76
26	670	494.85	66	750	492.73	106	830	494.28	146	918	498.9
27	672	494.33	67	752	492.65	107	832	494.35	147	938	502.99
28	674	494.3	68	754	492.65	108	834	494.42	148	957.87	503.04
29	676	494.27	69	756	492.7	109	836	494.48	149	976.31	502.35
30	678	494.24	70	758	492.74	110	838	494.57	150	997.3	502.04
31	680	494.21	71	760	492.79	111	840	494.78	151	1042.12	502.16
32	682	494.18	72	762	492.84	112	842	495	152	1106.56	502.29
33	684	494.15	73	764	492.83	113	844	495.22	153	1143.13	502.34
34	686	494.13	74	766	492.82	114	846	495.44	154	1196.13	502.88
35	688	494.1	75	768	492.81	115	848	495.49	155	1223.11	502.9
36	690	494.08	76	770	492.79	116	850	495.39	156	1306.21	502.21
37	692	494.06	77	772	492.78	117	852	495.3	157	1358.12	501.27
38	694	494.03	78	774	492.77	118	854	495.21	158	1418.35	503.76
39	696	494.01	79	776	492.76	119	856	495.12	159	1494.4	511.43
40	698	493.99	80	778	493.01	120	858	495.11	-	-	-

Tabela 68 – Características Geométricas da Seção SF95600 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	510	43	968	493.73	85	1052	490.71	127	1136	492.18
2	185	504.08	44	970	492.84	86	1054	490.95	128	1138	492.11
3	221	503.51	45	972	491.96	87	1056	490.97	129	1140	492.13
4	246	503.11	46	974	491.07	88	1058	490.99	130	1142	492.17
5	266	503	47	976	490.77	89	1060	491.01	131	1144	492.19
6	299	502.54	48	978	490.43	90	1062	491.04	132	1146	492.21
7	324	502.18	49	980	490.16	91	1064	491.06	133	1148	492.23
8	357	502.24	50	982	490.15	92	1066	491.08	134	1150	492.23
9	381.53	502.02	51	984	490.15	93	1068	491.21	135	1152	492.25
10	403.39	503.19	52	986	490.14	94	1070	491.34	136	1154	492.26
11	423.91	503.23	53	988	490.14	95	1072	491.48	137	1156	492.28
12	445.33	503.2	54	990	490.14	96	1074	491.61	138	1158	492.3
13	457.69	503.28	55	992	490.2	97	1076	491.74	139	1160	492.33
14	475.14	503.34	56	994	490.23	98	1078	491.87	140	1162	492.33
15	485.49	503.23	57	996	490.27	99	1080	491.9	141	1164	492.26
16	499.16	503.04	58	998	490.3	100	1082	491.92	142	1166	492.2
17	520.65	502.16	59	1000	490.3	101	1084	491.95	143	1168	492.13
18	531.07	502.16	60	1002	490.37	102	1086	491.98	144	1170	492.06
19	541.06	501.72	61	1004	490.37	103	1088	492.01	145	1172	492.06
20	559.55	500.66	62	1006	490.46	104	1090	492.05	146	1174	491.96
21	588.93	500.36	63	1008	490.51	105	1092	492.06	147	1176	491.94
22	611.79	500.03	64	1010	490.55	106	1094	492.07	148	1178	491.88
23	642.23	499.31	65	1012	490.6	107	1096	492.09	149	1180	492.01
24	667.86	499.96	66	1014	490.64	108	1098	492.1	150	1182	492.14
25	674.46	500.15	67	1016	490.7	109	1100	492.12	151	1184	492.14
26	688.35	500.46	68	1018	490.7	110	1102	492.14	152	1186	492.27
27	714.75	500.96	69	1020	490.74	111	1104	492.14	153	1188	492.66
28	738.4	501.39	70	1022	490.77	112	1106	492.14	154	1190	492.47
29	750.28	500.47	71	1024	490.8	113	1108	492.18	155	1192	492.28
30	762.8	500.19	72	1026	490.83	114	1110	492.22	156	1194	492.09
31	776.76	499.86	73	1028	490.86	115	1112	492.25	157	1196	492.89
32	805.53	499.65	74	1030	490.86	116	1114	492.29	158	1198	493.96
33	816.68	499.82	75	1032	490.85	117	1116	492.33	159	1200	494.55
34	829.82	500.25	76	1034	490.85	118	1118	492.33	160	1203.58	496.87
35	858.1	501.12	77	1036	490.84	119	1120	492.33	161	1218.5	499.28
36	871.71	501.62	78	1038	490.84	120	1122	492.42	162	1229.89	500.09
37	896.32	501.85	79	1040	490.84	121	1124	492.45	163	1246.49	502.76
38	926.1	503.03	80	1042	490.83	122	1126	492.48	164	1268.11	501.73
39	944.5	500.85	81	1044	490.85	123	1128	492.48	165	1294.57	501.86
40	956.76	497.44	82	1046	490.87	124	1130	492.41	166	1328.55	510.64
41	965	494.55	83	1048	490.69	125	1132	492.33	-	-	-
42	966	494.61	84	1050	490.69	126	1134	492.26	-	-	-

Tabela 69 – Características Geométricas da Seção SF92600 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	510	43	1766	490.42	85	1850	491.13	127	1934	491.05
2	715.67	498.45	44	1768	490.34	86	1852	491.13	128	1936	490.19
3	758.15	498.43	45	1770	490.31	87	1854	490.99	129	1938	491.02
4	808.02	498.43	46	1772	490.3	88	1856	490.81	130	1940	490.99
5	862.83	498.31	47	1774	490.22	89	1858	490.56	131	1942	490.99
6	906.19	498.14	48	1776	490.32	90	1860	490.34	132	1944	490.94
7	966.53	498.09	49	1778	490.24	91	1862	490.42	133	1946	490.92
8	1009.08	498.02	50	1780	490.2	92	1864	490.5	134	1948	490.91
9	1058.26	498.05	51	1782	490.15	93	1866	490.72	135	1950	490.89
10	1084.5	498.25	52	1784	490.16	94	1868	490.94	136	1952	490.88
11	1111.53	498.78	53	1786	490.16	95	1870	490.99	137	1954	490.84
12	1141.73	498.47	54	1788	490.17	96	1872	491.06	138	1956	490.84
13	1190.18	497.96	55	1790	490.24	97	1874	491	139	1958	491.32
14	1246.34	498.05	56	1792	490.22	98	1876	490.94	140	1960	491.51
15	1290.91	498.14	57	1794	490.21	99	1878	490.71	141	1962	491.71
16	1345.59	498.93	58	1796	490.2	100	1880	490.52	142	1964	491.95
17	1404.97	500.21	59	1798	490.15	101	1882	490.42	143	1966	490.82
18	1457.72	500.27	60	1800	490.32	102	1884	490.31	144	1968	490.79
19	1488.04	499.13	61	1802	490.45	103	1886	490.4	145	1970	490.65
20	1509.56	498.81	62	1804	490.58	104	1888	490.41	146	1972	490.56
21	1549.66	498.73	63	1806	490.66	105	1890	490.7	147	1974	490.5
22	1586.14	499.5	64	1808	490.52	106	1892	490.98	148	1976	490.32
23	1625.1	500.66	65	1810	490.35	107	1894	491.11	149	1978	490.21
24	1661.09	501.35	66	1812	490.41	108	1896	490.98	150	1980	490.14
25	1693.85	499.49	67	1814	490.5	109	1898	490.97	151	1982	490.38
26	1707.17	499.53	68	1816	490.68	110	1900	490.95	152	1984	490.42
27	1721.11	498.02	69	1818	490.88	111	1902	490.94	153	1986	490.52
28	1737.03	493.96	70	1820	490.88	112	1904	490.94	154	1988	490.98
29	1738	493.32	71	1822	490.92	113	1906	490.96	155	1990	491.12
30	1740	492.96	72	1824	490.93	114	1908	490.98	156	1992	491.9
31	1742	492.85	73	1826	490.93	115	1910	490.99	157	1994	492.49
32	1744	492.42	74	1828	490.94	116	1912	491.09	158	1996	493.39
33	1746	492.22	75	1830	491	117	1914	491.1	159	1998	493.92
34	1748	491.95	76	1832	491.1	118	1916	491.1	160	2000	493.96
35	1750	491.71	77	1834	491.19	119	1918	491.12	161	2004.6	495.27
36	1752	491.56	78	1836	491.21	120	1920	491.13	162	2016.29	499.03
37	1754	491.49	79	1838	491.2	121	1922	491.13	163	2036.9	499.97
38	1756	490.92	80	1840	491.14	122	1924	491.14	164	2054.78	499.56
39	1758	490.62	81	1842	491.14	123	1926	491.14	165	2093.65	501.59
40	1760	490.6	82	1844	491.14	124	1928	491.13	166	2132.18	505.32
41	1762	490.53	83	1846	491.14	125	1930	491.11	167	2188.79	509.76
42	1764	490.49	84	1848	491.14	126	1932	491.1	-	-	-

Tabela 70 – Características Geométricas da Seção SF86600 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	508.75	44	240	491.03	87	326	490.13	130	412	489.38
2	21	506.5	45	242	491.03	88	328	490.02	131	414	489.37
3	41	503.9	46	244	491.03	89	330	490.02	132	416	489.37
4	66	502.04	47	246	491.02	90	332	490.02	133	418	489.36
5	101	499.42	48	248	491	91	334	490.02	134	420	489.36
6	136	499.41	49	250	490.99	92	336	490.02	135	422	489.33
7	169	493.41	50	252	490.97	93	338	490.02	136	424	489.32
8	170	493.31	51	254	490.96	94	340	490.01	137	426	489.32
9	171	492.99	52	256	490.94	95	342	490.01	138	428	489.3
10	172	492.88	53	258	490.93	96	344	490.01	139	430	489.29
11	174	492.67	54	260	490.91	97	346	490	140	432	489.28
12	176	492.43	55	262	490.89	98	348	489.91	141	434	489.27
13	178	492.26	56	264	490.88	99	350	489.89	142	436	489.26
14	180	492.09	57	266	490.88	100	352	489.88	143	438	489.24
15	182	491.97	58	268	490.88	101	354	489.88	144	440	489.22
16	184	491.83	59	270	490.87	102	356	489.81	145	442	493.41
17	186	491.71	60	272	490.86	103	358	489.79	146	472.15	495.35
18	188	491.66	61	274	490.86	104	360	489.75	147	504.31	497.65
19	190	491.62	62	276	490.85	105	362	489.71	148	534.24	495.97
20	192	491.57	63	278	490.85	106	364	489.69	149	569.13	498.63
21	194	491.52	64	280	490.84	107	366	489.67	150	599.32	500.42
22	196	491.49	65	282	490.83	108	368	489.66	151	622.11	498.8
23	198	491.49	66	284	490.83	109	370	489.63	152	664.01	499.54
24	200	491.45	67	286	490.83	110	372	489.57	153	694.31	500.2
25	202	491.38	68	288	490.83	111	374	489.55	154	746.15	498.71
26	204	491.31	69	290	490.82	112	376	489.55	155	803.3	498.65
27	206	491.24	70	292	490.82	113	378	489.54	156	853.22	499.22
28	208	491.24	71	294	490.81	114	380	489.53	157	898.25	498.32
29	210	491.2	72	296	490.81	115	382	489.51	158	943.12	497.63
30	212	491.18	73	298	490.73	116	384	489.5	159	988.12	497.58
31	214	491.17	74	300	490.72	117	386	489.5	160	1038.25	497.72
32	216	491.17	75	302	490.72	118	388	489.49	161	1093.42	497.96
33	218	491.15	76	304	490.64	119	390	489.49	162	1133.57	498.3
34	220	491.13	77	306	490.6	120	392	489.49	163	1188.12	498.42
35	222	491.13	78	308	490.58	121	394	489.48	164	1243.24	498.7
36	224	491.11	79	310	490.55	122	396	489.48	165	1288.34	499.09
37	226	491.1	80	312	490.52	123	398	489.46	166	1333.12	499.28
38	228	491.1	81	314	490.51	124	400	489.44	167	1386.31	499.76
39	230	491.08	82	316	490.46	125	402	489.44	168	1443.13	500.17
40	232	491.06	83	318	490.38	126	404	489.43	169	1483.29	500.73
41	234	491.05	84	320	490.3	127	406	489.43	170	1503.33	500.88
42	236	491.04	85	322	490.26	128	408	489.4	171	1542	505
43	238	491.03	86	324	490.14	129	410	489.4	-	-	-

Tabela 71 – Características Geométricas da Seção SF83200 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	504.04	36	1017	488.52	71	1087	487.45	106	1157	489.37
2	36	503.48	37	1019	488.47	72	1089	487.41	107	1159	489.49
3	94	502.75	38	1021	488.43	73	1091	487.36	108	1161	489.61
4	147	501.82	39	1023	488.41	74	1093	487.31	109	1163	489.73
5	202	500.71	40	1025	488.4	75	1095	487.26	110	1165	489.62
6	247	498.05	41	1027	488.38	76	1097	487.25	111	1167	489.48
7	453	497.98	42	1029	488.37	77	1099	487.32	112	1169	489.34
8	493	496.44	43	1031	488.34	78	1101	487.4	113	1171	489.25
9	532	496.46	44	1033	488.31	79	1103	487.47	114	1173	489.31
10	626	495.59	45	1035	488.2	80	1105	487.54	115	1175	489.37
11	681	496.68	46	1037	488.01	81	1107	487.6	116	1177	489.44
12	729	496.65	47	1039	487.82	82	1109	487.59	117	1179	489.5
13	774	497.19	48	1041	487.8	83	1111	487.58	118	1181	489.55
14	826	497.76	49	1043	487.91	84	1113	487.64	119	1183	489.6
15	878	498.3	50	1045	488.02	85	1115	487.72	120	1185	489.65
16	903	499.64	51	1047	488.02	86	1117	487.71	121	1187	489.7
17	928	499.5	52	1049	487.94	87	1119	487.52	122	1189	489.78
18	953	497.76	53	1051	487.86	88	1121	487.32	123	1191	490.07
19	983	492.37	54	1053	487.79	89	1123	487.13	124	1193	490.36
20	985	491.68	55	1055	487.71	90	1125	486.94	125	1195	490.65
21	987	490.9	56	1057	487.8	91	1127	486.9	126	1197	491.04
22	989	490.12	57	1059	487.94	92	1129	487.22	127	1199	491.47
23	991	489.55	58	1061	487.91	93	1131	487.54	128	1201	491.89
24	993	489.51	59	1063	487.87	94	1133	487.86	129	1203	492.37
25	995	489.47	60	1065	487.83	95	1135	488.19	130	1210.78	493.89
26	997	489.24	61	1067	487.79	96	1137	488.39	131	1215.52	495.26
27	999	488.62	62	1069	487.74	97	1139	488.54	132	1220.55	497.05
28	1001	488.27	63	1071	487.68	98	1141	488.69	133	1225.49	500.54
29	1003	488.39	64	1073	487.62	99	1143	488.83	134	1231.06	502.71
30	1005	488.51	65	1075	487.57	100	1145	488.98	135	1234.86	503.92
31	1007	488.63	66	1077	487.55	101	1147	489.03	136	1240.13	505.13
32	1009	488.74	67	1079	487.53	102	1149	489.09	137	1245.13	506.03
33	1011	488.69	68	1081	487.51	103	1151	489.15	138	1249.24	506.88
34	1013	488.63	69	1083	487.49	104	1153	489.21	139	1255.33	507.49
35	1015	488.58	70	1085	487.47	105	1155	489.27	-	-	-



Tabela 72 – Características Geométricas da Seção SF77200 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	508.25	43	657	489.65	85	741	487.72	127	825	487.68
2	32	505.72	44	659	489.66	86	743	487.63	128	827	487.66
3	67	503.67	45	661	489.68	87	745	487.61	129	829	487.64
4	105	500.85	46	663	489.69	88	747	487.45	130	831	487.62
5	159	499.58	47	665	489.7	89	749	487.5	131	833	487.66
6	209	499.52	48	667	489.71	90	751	487.55	132	835	487.73
7	259	498.99	49	669	489.73	91	753	487.6	133	837	487.8
8	306	499.36	50	671	489.74	92	755	487.65	134	839	487.85
9	359	498.28	51	673	489.75	93	757	487.44	135	841	487.88
10	410	497.65	52	675	489.76	94	759	487.23	136	843	487.77
11	455	497.54	53	677	489.76	95	761	487.62	137	845	487.66
12	498	497.55	54	679	489.76	96	763	487.5	138	847	487.6
13	531	497.55	55	681	489.76	97	765	487.38	139	849	487.61
14	569	498.63	56	683	489.76	98	767	487.26	140	851	487.63
15	603	491.26	57	685	489.76	99	769	487.14	141	853	487.73
16	604	491.18	58	687	489.75	100	771	487.17	142	855	487.84
17	605	491.04	59	689	489.74	101	773	487.23	143	857	487.94
18	607	490.75	60	691	489.72	102	775	487.29	144	859	488
19	609	490.46	61	693	489.69	103	777	487.35	145	861	488.06
20	611	490.17	62	695	489.66	104	779	487.36	146	863	488.22
21	613	490.08	63	697	489.63	105	781	487.34	147	865	488.86
22	615	490.08	64	699	489.6	106	783	487.32	148	867	489.49
23	617	490.09	65	701	489.55	107	785	487.3	149	869	490.08
24	619	490.1	66	703	489.42	108	787	487.28	150	871	490.65
25	621	490.09	67	705	489.3	109	789	487.27	151	873	491.26
26	623	490.05	68	707	489.18	110	791	487.25	152	878.11	492.24
27	625	490.01	69	709	489.08	111	793	487.23	153	888.24	493.41
28	627	489.96	70	711	489	112	795	487.21	154	908.33	493.41
29	629	489.92	71	713	488.93	113	797	487.19	155	943.36	496.54
30	631	489.88	72	715	488.86	114	799	487.17	156	989.38	495.65
31	633	489.86	73	717	488.85	115	801	487.15	157	1018.86	495.01
32	635	489.83	74	719	488.89	116	803	487.12	158	1166.91	498.33
33	637	489.81	75	721	488.93	117	805	487.17	159	1232.9	497.7
34	639	489.78	76	723	488.88	118	807	487.23	160	1366.51	496.95
35	641	489.76	77	725	488.8	119	809	487.29	161	1445.12	497.29
36	643	489.73	78	727	488.72	120	811	487.34	162	1540.78	497.65
37	645	489.7	79	729	488.64	121	813	487.4	163	1633.36	497.2
38	647	489.68	80	731	488.52	122	815	487.41	164	1715.94	496.6
39	649	489.65	81	733	488.36	123	817	487.4	165	1792.62	496.5
40	651	489.62	82	735	488.2	124	819	487.39	166	1852.6	496.95
41	653	489.63	83	737	488.04	125	821	487.44	167	1901.59	497.24
42	655	489.64	84	739	487.88	126	823	487.57	168	2373	508

Tabela 73 – Características Geométricas da Seção SF71100 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	505.28	38	673	485.92	75	747	485.68	112	821	486.56
2	24	505.15	39	675	485.9	76	749	485.59	113	823	486.76
3	56	504.34	40	677	485.87	77	751	485.51	114	825	486.96
4	93	503.51	41	679	485.92	78	753	485.46	115	827	486.85
5	129	502.67	42	681	485.98	79	755	485.44	116	829	486.72
6	161	501.94	43	683	486.04	80	757	485.42	117	831	486.58
7	193	501.31	44	685	486.1	81	759	485.4	118	833	486.45
8	223	500.89	45	687	486.16	82	761	485.38	119	835	486.32
9	255	500.61	46	689	486.23	83	763	485.36	120	837	486.47
10	281	500.34	47	691	486.29	84	765	485.38	121	839	486.76
11	312	500.07	48	693	486.36	85	767	485.39	122	841	487.3
12	344	499.65	49	695	486.28	86	769	485.41	123	843	488.41
13	378	499.27	50	697	486.19	87	771	485.42	124	845	489.48
14	401	498.82	51	699	486.11	88	773	485.4	125	849.97	491.41
15	432	497.77	52	701	486.02	89	775	485.35	126	859.45	492.27
16	467	496.13	53	703	485.94	90	777	485.29	127	867.06	494.22
17	489	496.02	54	705	485.88	91	779	485.24	128	873.53	494.93
18	522	497.43	55	707	485.83	92	781	485.18	129	881.03	495.1
19	548	498.28	56	709	485.77	93	783	485.16	130	894.09	494.91
20	581	498.34	57	711	485.72	94	785	485.16	131	901.04	495.08
21	613	497.12	58	713	485.66	95	787	485.16	132	911.88	495.74
22	643.5	489.48	59	715	485.67	96	789	485.16	133	917.38	495.71
23	644	489.05	60	717	485.69	97	791	485.15	134	926.17	495.51
24	645	488.51	61	719	485.71	98	793	485.15	135	935.98	495.55
25	647	487.42	62	721	485.73	99	795	485.18	136	946.43	495.62
26	649	486.34	63	723	485.74	100	797	485.31	137	984.59	495.04
27	651	486.03	64	725	485.75	101	799	485.45	138	1069.4	494
28	653	486.17	65	727	485.76	102	801	485.59	139	1117.43	494.31
29	655	486.32	66	729	485.84	103	803	485.67	140	1154.55	493.88
30	657	486.45	67	731	486.19	104	805	485.67	141	1211.62	494.24
31	659	486.4	68	733	486.55	105	807	485.66	142	1286.11	493.04
32	661	486.36	69	735	486.9	106	809	485.66	143	1332.07	492.8
33	663	486.31	70	737	486.69	107	811	485.75	144	1381.65	493.4
34	665	486.2	71	739	486.38	108	813	485.89	145	1432.52	494.12
35	667	486.1	72	741	486.07	109	815	486.03	146	1472.69	500.73
36	669	486	73	743	485.84	110	817	486.17	147	1511.17	503.42
37	671	485.94	74	745	485.76	111	819	486.37	-	-	-

Tabela 74 – Características Geométricas da Seção SF68200 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	505	44	1302	484.97	87	1388	485.19	130	1474	487.07
2	291	494.24	45	1304	485.04	88	1390	485.18	131	1476	487
3	323	494.47	46	1306	485.11	89	1392	485.27	132	1478	486.94
4	368	494.37	47	1308	485.19	90	1394	485.35	133	1480	486.87
5	415	495.36	48	1310	485.26	91	1396	485.4	134	1482	486.78
6	463	494.97	49	1312	485.28	92	1398	485.45	135	1484	486.68
7	515	496.28	50	1314	485.3	93	1400	485.5	136	1486	486.58
8	571	496.65	51	1316	485.32	94	1402	485.55	137	1488	486.49
9	616	496.78	52	1318	485.32	95	1404	485.6	138	1490	486.39
10	669	496.99	53	1320	485.28	96	1406	485.66	139	1492	486.73
11	717	496.99	54	1322	485.23	97	1408	485.59	140	1494	487.23
12	770	496.96	55	1324	485.19	98	1410	485.53	141	1496	487.74
13	825	496.77	56	1326	485.14	99	1412	485.46	142	1498	488.24
14	857	496.66	57	1328	485.14	100	1414	485.4	143	1500	488.75
15	890	496.29	58	1330	485.14	101	1416	485.38	144	1506.55	491.48
16	923	495.69	59	1332	485.13	102	1418	485.4	145	1518.53	491.92
17	954	493.99	60	1334	485.13	103	1420	485.41	146	1527.44	494
18	990	493.17	61	1336	485.13	104	1422	485.42	147	1541	496.16
19	1023	492.76	62	1338	485.13	105	1424	485.43	148	1547.77	496.41
20	1055	492.62	63	1340	485.13	106	1426	485.45	149	1557.62	496.46
21	1078	492.91	64	1342	485.13	107	1428	485.46	150	1569.03	496.36
22	1109	494.02	65	1344	485.14	108	1430	485.47	151	1579.79	495.93
23	1140	494.71	66	1346	485.15	109	1432	485.48	152	1593.21	495.47
24	1172	493.87	67	1348	485.16	110	1434	485.47	153	1602.6	495.22
25	1202	494.98	68	1350	485.23	111	1436	485.46	154	1615.28	495.19
26	1241	494.68	69	1352	485.32	112	1438	485.46	155	1628.78	495.26
27	1270.98	488.75	70	1354	485.4	113	1440	485.49	156	1646.35	495.68
28	1271	488.74	71	1356	485.45	114	1442	485.53	157	1658.95	495.49
29	1272	488.08	72	1358	485.49	115	1444	485.56	158	1670.4	495.49
30	1274	486.77	73	1360	485.53	116	1446	485.59	159	1681.89	495.43
31	1276	485.45	74	1362	485.52	117	1448	485.63	160	1745.38	495.18
32	1278	484.89	75	1364	485.4	118	1450	485.66	161	1799.23	495.52
33	1280	484.77	76	1366	485.3	119	1452	485.76	162	1843.62	496.34
34	1282	484.65	77	1368	485.21	120	1454	485.87	163	1881.86	496.91
35	1284	484.72	78	1370	485.13	121	1456	485.98	164	1948.91	497.57
36	1286	484.81	79	1372	485.2	122	1458	486.08	165	2007.05	497.92
37	1288	484.79	80	1374	485.29	123	1460	486.19	166	2066.67	498.51
38	1290	484.7	81	1376	485.38	124	1462	486.3	167	2125.45	499.26
39	1292	484.72	82	1378	485.44	125	1464	486.48	168	2184	500.41
40	1294	484.83	83	1380	485.41	126	1466	486.68	169	2226.74	501.41
41	1296	484.88	84	1382	485.39	127	1468	486.87	170	2269.29	502.83
42	1298	484.91	85	1384	485.36	128	1470	487.06	171	2342.35	505.02
43	1300	484.94	86	1386	485.27	129	1472	487.14	-	-	-

Tabela 75 – Características Geométricas da Seção SF63800 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	505	39	1812	485.97	77	1888	485.89	115	1964	487.87
2	763	492.85	40	1814	486	78	1890	485.91	116	1966	487.89
3	785	493.03	41	1816	486.04	79	1892	485.93	117	1968	487.77
4	802	493.3	42	1818	486.07	80	1894	485.95	118	1970	487.63
5	834	493.6	43	1820	486.1	81	1896	485.97	119	1972	487.49
6	857	494.15	44	1822	486.14	82	1898	485.99	120	1974	487.46
7	1121	492.66	45	1824	486.17	83	1900	486.02	121	1976	487.45
8	1143	494.07	46	1826	486.06	84	1902	486.05	122	1978	487.43
9	1167	494.14	47	1828	485.91	85	1904	486.08	123	1980	487.42
10	1193	493.79	48	1830	485.77	86	1906	486.11	124	1982	487.4
11	1222	492.87	49	1832	485.63	87	1908	486.2	125	1984	487.38
12	1416	492.25	50	1834	485.49	88	1910	486.43	126	1986	487.37
13	1435	492.62	51	1836	485.35	89	1912	486.66	127	1988	487.43
14	1463	493.04	52	1838	485.21	90	1914	486.9	128	1990	487.67
15	1495	493.99	53	1840	485.2	91	1916	487.13	129	1992	487.9
16	1527	493	54	1842	485.2	92	1918	487.21	130	1994	488.13
17	1551	492.76	55	1844	485.19	93	1920	487.23	131	1996	488.37
18	1582	493.16	56	1846	485.18	94	1922	487.25	132	1998	488.6
19	1605	493.57	57	1848	485.17	95	1924	487.27	133	2000	488.83
20	1639	494.47	58	1850	485.19	96	1926	487.28	134	2020.31	492.04
21	1663	495.6	59	1852	485.27	97	1928	487.3	135	2040	494.92
22	1694	491.87	60	1854	485.34	98	1930	487.32	136	2060.09	495.3
23	1705.05	488.83	61	1856	485.42	99	1932	487.36	137	2080.97	494.81
24	1782	486.97	62	1858	485.49	100	1934	487.42	138	2101.82	494.84
25	1784	486.96	63	1860	485.57	101	1936	487.49	139	2122.72	494.42
26	1786	486.94	64	1862	485.66	102	1938	487.56	140	2142.86	494
27	1788	486.93	65	1864	485.76	103	1940	487.63	141	2177	494.07
28	1790	486.84	66	1866	485.86	104	1942	487.69	142	2221.41	493.98
29	1792	486.65	67	1868	485.96	105	1944	487.72	143	2266.49	496
30	1794	486.54	68	1870	486.06	106	1946	487.69	144	2322.4	498.31
31	1796	486.44	69	1872	486.16	107	1948	487.67	145	2384.53	500.24
32	1798	486.34	70	1874	486.09	108	1950	487.68	146	2430.73	501.48
33	1800	486.25	71	1876	485.98	109	1952	487.81	147	2459.15	502.37
34	1802	486.17	72	1878	485.86	110	1954	487.94	148	2495.42	503.49
35	1804	486.12	73	1880	485.75	111	1956	487.91	149	2530.17	504.61
36	1806	486.06	74	1882	485.74	112	1958	487.87	-	-	-
37	1808	486.01	75	1884	485.82	113	1960	487.84	-	-	-
38	1810	485.95	76	1886	485.88	114	1962	487.86	-	-	-

Tabela 76 – Características Geométricas da Seção SF57000 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	504.59	44	463	484.59	87	549	483.9	130	635	483.36
2	31	503.28	45	465	484.6	88	551	483.89	131	637	483.51
3	44	502.4	46	467	484.6	89	553	483.87	132	639	483.66
4	71	501.13	47	469	484.61	90	555	483.86	133	641	483.69
5	99	499.51	48	471	484.62	91	557	483.83	134	643	483.72
6	135	497.59	49	473	484.64	92	559	483.79	135	645	483.74
7	171	496.04	50	475	484.65	93	561	483.75	136	647	483.98
8	208	494.03	51	477	484.66	94	563	483.71	137	649	484.61
9	239	492.6	52	479	484.68	95	565	483.67	138	651	485.25
10	269	491.93	53	481	484.7	96	567	483.64	139	653	486.21
11	300	492.24	54	483	484.74	97	569	483.62	140	655	487.18
12	331	493.55	55	485	484.78	98	571	483.6	141	657	488.15
13	360	493.84	56	487	484.82	99	573	483.58	142	660.32	490.66
14	384	492.96	57	489	484.86	100	575	483.56	143	668.03	492.43
15	403	491.17	58	491	484.89	101	577	483.54	144	676.63	493.07
16	410	488.15	59	493	484.77	102	579	483.47	145	681.58	493.77
17	413	487.33	60	495	484.64	103	581	483.41	146	689.34	494.77
18	413.97	487.35	61	497	484.52	104	583	483.35	147	698.49	495.05
19	414	487.33	62	499	484.39	105	585	483.28	148	708.54	495.14
20	415	486.71	63	501	484.24	106	587	483.22	149	731.86	495
21	417	485.46	64	503	484.09	107	589	483.18	150	751.5	494.67
22	419	484.9	65	505	484.08	108	591	483.15	151	781.17	493.6
23	421	484.89	66	507	484.1	109	593	483.12	152	805.88	493.28
24	423	484.88	67	509	484.13	110	595	483.09	153	853.84	492.99
25	425	484.96	68	511	484.15	111	597	483.13	154	901.47	492.45
26	427	485.14	69	513	484.19	112	599	483.19	155	934.5	492.13
27	429	485.31	70	515	484.23	113	601	483.24	156	969.18	491.77
28	431	485.32	71	517	484.28	114	603	483.29	157	1032.99	491.9
29	433	485.23	72	519	484.33	115	605	483.33	158	1106.81	490.59
30	435	485.14	73	521	484.37	116	607	483.36	159	1174.9	492.02
31	437	485.06	74	523	484.35	117	609	483.39	160	1241.11	494.23
32	439	485.02	75	525	484.33	118	611	483.4	161	1310.57	495.97
33	441	484.97	76	527	484.31	119	613	483.27	162	1372.14	496.53
34	443	484.93	77	529	484.28	120	615	483.14	163	1442.54	496.19
35	445	484.88	78	531	484.38	121	617	483.21	164	1510.99	495.68
36	447	484.84	79	533	484.48	122	619	483.31	165	1577.44	495.31
37	449	484.8	80	535	484.49	123	621	483.33	166	1618.12	495.31
38	451	484.75	81	537	484.17	124	623	483.25	167	1654.28	495.33
39	453	484.71	82	539	483.85	125	625	483.21	168	1690.54	495.3
40	455	484.67	83	541	483.87	126	627	483.18	169	1702.08	495.37
41	457	484.63	84	543	483.89	127	629	483.17	170	2157	505
42	459	484.59	85	545	483.92	128	631	483.23	-	-	-
43	461	484.58	86	547	483.92	129	633	483.29	-	-	-

Tabela 77 – Características Geométricas da Seção SF53400 do Rio São Francisco

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	497.24	45	1170	484.21	89	1258	483.88	133	1346	483.29
2	25	496.61	46	1172	484.23	90	1260	483.85	134	1348	483.25
3	68	496.22	47	1174	484.26	91	1262	483.81	135	1350	483.31
4	119	494.8	48	1176	484.28	92	1264	483.77	136	1352	483.37
5	170	494.13	49	1178	484.31	93	1266	483.73	137	1354	483.29
6	226	493.74	50	1180	484.33	94	1268	483.73	138	1356	483.21
7	275	493.64	51	1182	484.36	95	1270	483.8	139	1358	483.3
8	324	493.68	52	1184	484.31	96	1272	483.87	140	1360	483.54
9	378	493.39	53	1186	484.25	97	1274	483.9	141	1362	483.66
10	429	492.69	54	1188	484.19	98	1276	483.93	142	1364	483.66
11	482	491.21	55	1190	484.16	99	1278	483.96	143	1366	483.73
12	538	490.75	56	1192	484.13	100	1280	483.94	144	1368	483.83
13	594	490.95	57	1194	484.09	101	1282	483.86	145	1370	484.71
14	640	490.79	58	1196	484	102	1284	483.77	146	1372	486.27
15	687	490.37	59	1198	483.91	103	1286	483.68	147	1378.91	488.67
16	731	490.96	60	1200	483.87	104	1288	483.63	148	1387.9	489.86
17	763	490.58	61	1202	483.87	105	1290	483.57	149	1396.95	492.45
18	796	490.37	62	1204	483.86	106	1292	483.51	150	1406.12	492.66
19	861	490.32	63	1206	483.89	107	1294	483.46	151	1414.73	492.08
20	894	490.83	64	1208	483.92	108	1296	483.43	152	1426.24	491.54
21	929	491.56	65	1210	483.95	109	1298	483.4	153	1443.2	491.16
22	969	492.08	66	1212	483.98	110	1300	483.4	154	1463.27	490.84
23	995	492.59	67	1214	483.92	111	1302	483.42	155	1489.2	490.75
24	1030	491.19	68	1216	483.85	112	1304	483.45	156	1526.44	490.57
25	1054	486.27	69	1218	483.8	113	1306	483.47	157	1562.67	490.63
26	1056	486.27	70	1220	483.79	114	1308	483.58	158	1596.72	490.84
27	1058	485.62	71	1222	483.78	115	1310	483.72	159	1632.8	490.89
28	1060	484.96	72	1224	483.8	116	1312	483.87	160	1670.66	491.07
29	1062	484.31	73	1226	483.82	117	1314	483.96	161	1742.04	491.37
30	1064	483.66	74	1228	483.84	118	1316	484.05	162	1788.04	491.8
31	1066	483.41	75	1230	483.87	119	1318	484.06	163	1850.28	492.16
32	1068	483.43	76	1232	483.91	120	1320	484.06	164	1918.02	492.73
33	1070	483.45	77	1234	484	121	1322	484.06	165	2006.01	493.3
34	1072	483.51	78	1236	484.09	122	1324	483.95	166	2049.6	493.78
35	1074	483.58	79	1238	484.14	123	1326	483.84	167	2107.01	494.38
36	1076	483.64	80	1240	484.1	124	1328	483.77	168	2136.55	494.74
37	1154	483.63	81	1242	484.05	125	1330	483.69	169	2215.15	495.59
38	1156	483.68	82	1244	484	126	1332	483.64	170	2275.78	495.71
39	1158	483.75	83	1246	483.96	127	1334	483.61	171	2320.84	496.82
40	1160	483.82	84	1248	483.91	128	1336	483.57	172	2372.53	496.47
41	1162	483.91	85	1250	483.87	129	1338	483.51	173	2420.61	497.39
42	1164	484	86	1252	483.84	130	1340	483.45	174	2457.76	497.77
43	1166	484.09	87	1254	483.85	131	1342	483.39	-	-	-
44	1168	484.18	88	1256	483.87	132	1344	483.33	-	-	-

Tabela 78 – Características Geométricas da Seção SF44700 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	493.44	41	947	484.08	81	1105	483.56	121	1185	482.95
2	51	490.84	42	949	484.04	82	1107	483.62	122	1187	482.96
3	101	491.39	43	1029	484.83	83	1109	483.67	123	1189	482.97
4	151	491.95	44	1031	484.86	84	1111	483.72	124	1191	482.98
5	201	492.59	45	1033	484.89	85	1113	483.78	125	1193	482.99
6	251	493	46	1035	484.93	86	1115	483.83	126	1195	483
7	305	491.96	47	1037	484.98	87	1117	483.88	127	1197	483.01
8	352	490.91	48	1039	485.04	88	1119	483.9	128	1199	482.99
9	404	490.65	49	1041	485.05	89	1121	483.89	129	1201	482.94
10	453	490.7	50	1043	485.06	90	1123	483.88	130	1203	482.89
11	504	490.76	51	1045	485.07	91	1125	483.87	131	1205	482.84
12	552	490.91	52	1047	485.08	92	1127	483.86	132	1207	482.79
13	603	491.02	53	1049	485.08	93	1129	483.85	133	1209	482.7
14	653	491.23	54	1051	485.05	94	1131	483.84	134	1211	482.61
15	703	491.56	55	1053	485.03	95	1133	483.83	135	1213	482.52
16	754	491.61	56	1055	485.08	96	1135	483.82	136	1215	482.43
17	804	492.34	57	1057	485.2	97	1137	483.81	137	1217	482.34
18	854	492.61	58	1059	484.61	98	1139	483.7	138	1219	482.28
19	904	485.75	59	1061	483.7	99	1141	483.53	139	1221	482.23
20	905	485.52	60	1063	483.98	100	1143	483.36	140	1223	482.4
21	907	485.06	61	1065	484.02	101	1145	483.18	141	1225	482.77
22	909	484.6	62	1067	484.02	102	1147	483.01	142	1227	483.14
23	911	484.15	63	1069	484.02	103	1149	482.84	143	1229	483.51
24	913	484.07	64	1071	483.94	104	1151	482.7	144	1231	483.44
25	915	484.1	65	1073	483.88	105	1153	482.67	145	1233	483.36
26	917	484.14	66	1075	484.04	106	1155	482.64	146	1235	483.29
27	919	484.21	67	1077	484.14	107	1157	482.61	147	1237	483.45
28	921	484.31	68	1079	484.1	108	1159	482.58	148	1239	483.95
29	923	484.41	69	1081	484.05	109	1161	482.55	149	1241	484.46
30	925	484.51	70	1083	484.04	110	1163	482.55	150	1243	484.96
31	927	484.52	71	1085	484.04	111	1165	482.65	151	1245	485.65
32	929	484.5	72	1087	484.03	112	1167	482.74	152	1248.02	487.49
33	931	484.45	73	1089	484.02	113	1169	482.84	153	1252.2	489.08
34	933	484.38	74	1091	483.91	114	1171	482.93	154	1257.59	489.74
35	935	484.31	75	1093	483.77	115	1173	483.03	155	1261.97	489.35
36	937	484.27	76	1095	483.63	116	1175	483.05	156	1266	491.53
37	939	484.23	77	1097	483.56	117	1177	483.03	157	1286.6	491.05
38	941	484.19	78	1099	483.56	118	1179	483.01	158	1297.58	493.62
39	943	484.16	79	1101	483.55	119	1181	482.99	-	-	-
40	945	484.13	80	1103	483.55	120	1183	482.96	-	-	-

Tabela 79 – Características Geométricas da Seção SF38800 do Rio São Francisco - Parte I

nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)	nº	h(m)	z(m)
1	0	495	37	1662	481.65	73	1734	482.35
2	500	490	38	1664	481.85	74	1736	482.38
3	801.76	486.2	39	1666	481.98	75	1738	482.51
4	898.28	486.48	40	1668	482.03	76	1740	482.68
5	978.28	486.91	41	1670	482.08	77	1742	482.56
6	1129.16	487.63	42	1672	482.11	78	1744	482.39
7	1249.72	488.81	43	1674	482.14	79	1746	482.27
8	1350.08	489.14	44	1676	482.11	80	1748	482.18
9	1430.63	489.1	45	1678	481.97	81	1750	482.12
10	1500.87	489.4	46	1680	481.88	82	1752	482.23
11	1563	490.38	47	1682	481.8	83	1754	482.36
12	1613	485.26	48	1684	481.77	84	1756	482.46
13	1614	484.98	49	1686	481.87	85	1758	482.59
14	1616	484.42	50	1688	481.95	86	1760	482.73
15	1618	483.86	51	1690	481.95	87	1762	482.73
16	1620	483.3	52	1692	481.96	88	1764	482.74
17	1622	482.73	53	1694	481.96	89	1766	482.72
18	1624	482.17	54	1696	481.92	90	1768	482.7
19	1626	481.71	55	1698	481.86	91	1770	482.66
20	1628	481.51	56	1700	481.8	92	1772	482.64
21	1630	481.3	57	1702	481.74	93	1774	482.64
22	1632	481.1	58	1704	481.86	94	1776	482.58
23	1634	481.03	59	1706	481.98	95	1778	482.53
24	1636	481.14	60	1708	482.1	96	1780	482.55
25	1638	481.25	61	1710	482.22	97	1782	482.62
26	1640	481.39	62	1712	482.17	98	1784	482.68
27	1642	481.54	63	1714	482.12	99	1786	482.75
28	1644	481.69	64	1716	482.07	100	1788	482.83
29	1646	481.72	65	1718	482.01	101	1790	482.89
30	1648	481.75	66	1720	481.95	102	1792	482.94
31	1650	481.79	67	1722	481.88	103	1794	483.1
32	1652	481.75	68	1724	481.82	104	1796	483.27
33	1654	481.67	69	1726	481.76	105	1798	483.42
34	1656	481.59	70	1728	482.09	106	1800	483.55
35	1658	481.54	71	1730	482.26	107	1802	483.68
36	1660	481.5	72	1732	482.32	108	1804	483.71



Tabela 80 – Características Geométricas da Seção SF38800 do Rio São Francisco - Parte II

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
109	1806	483.6	144	1876	483.89	179	1946	482.94
110	1808	483.39	145	1878	483.88	180	1948	482.99
111	1810	483.36	146	1880	483.84	181	1950	483.06
112	1812	483.47	147	1882	483.8	182	1952	483.14
113	1814	483.61	148	1884	483.78	183	1954	483.18
114	1816	483.5	149	1886	483.76	184	1956	483.16
115	1818	483.41	150	1888	483.71	185	1958	483.14
116	1820	483.49	151	1890	483.61	186	1960	483.19
117	1822	483.42	152	1892	483.58	187	1962	483.24
118	1824	483.25	153	1894	483.6	188	1964	483.3
119	1826	483.22	154	1896	483.62	189	1966	483.3
120	1828	483.36	155	1898	483.62	190	1968	483.3
121	1830	483.52	156	1900	483.58	191	1970	483.3
122	1832	483.46	157	1902	483.53	192	1972	483.31
123	1834	483.39	158	1904	483.49	193	1974	483.36
124	1836	483.28	159	1906	483.46	194	1976	483.43
125	1838	483.22	160	1908	483.49	195	1978	483.49
126	1840	483.21	161	1910	483.48	196	1980	483.55
127	1842	483.36	162	1912	483.45	197	1982	483.59
128	1844	483.55	163	1914	483.42	198	1984	483.63
129	1846	483.59	164	1916	483.45	199	1986	483.67
130	1848	483.64	165	1918	483.49	200	1988	483.74
131	1850	483.68	166	1920	483.5	201	1990	483.81
132	1852	483.71	167	1922	483.42	202	1992	483.88
133	1854	483.68	168	1924	483.34	203	1994	484.11
134	1856	483.62	169	1926	483.31	204	1996	484.48
135	1858	483.56	170	1928	483.31	205	1998	484.85
136	1860	483.55	171	1930	483.31	206	2000	485.26
137	1862	483.64	172	1932	483.28	207	2050	487.41
138	1864	483.71	173	1934	483.26	208	2211.18	489.79
139	1866	483.7	174	1936	483.23	209	2391.76	496.89
140	1868	483.84	175	1938	483.17	210	2522.35	498.14
141	1870	483.81	176	1940	483.11	211	2652.94	499.09
142	1872	483.7	177	1942	483.05	212	2783.53	500.67
143	1874	483.81	178	1944	482.99	213	2914.12	502.04

Tabela 81 – Características Geométricas da Seção SF35400 do Rio São Francisco - Parte I

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	490	41	1636	482.23	81	1716	482.36
2	541	486.23	42	1638	482.15	82	1718	482.32
3	573	486.16	43	1640	482.06	83	1720	482.29
4	615	486.03	44	1642	482.05	84	1722	482.27
5	672	486.11	45	1644	482.07	85	1724	482.25
6	729	486.03	46	1646	482.09	86	1726	482.24
7	778	485.79	47	1648	482.11	87	1728	482.23
8	822	485.87	48	1650	482.17	88	1730	482.23
9	878	485.91	49	1652	482.23	89	1732	482.22
10	924	485.22	50	1654	482.25	90	1734	482.23
11	973	485.38	51	1656	482.26	91	1736	482.26
12	1007	486.25	52	1658	482.28	92	1738	482.29
13	1045	486.15	53	1660	482.29	93	1740	482.32
14	1083	485.87	54	1662	482.29	94	1742	482.35
15	1121	486.5	55	1664	482.3	95	1744	482.31
16	1191	486.61	56	1666	482.3	96	1746	482.24
17	1223	486.75	57	1668	482.37	97	1748	482.17
18	1256	486.96	58	1670	482.44	98	1750	482.16
19	1288	486.74	59	1672	482.45	99	1752	482.19
20	1325	486.82	60	1674	482.44	100	1754	482.23
21	1364	486.83	61	1676	482.44	101	1756	482.2
22	1401	486.78	62	1678	482.43	102	1758	482.17
23	1433	486.72	63	1680	482.43	103	1760	482.18
24	1465	486.52	64	1682	482.42	104	1762	482.3
25	1501	486.62	65	1684	482.44	105	1764	482.24
26	1534	486.61	66	1686	482.45	106	1766	482.15
27	1565	486.83	67	1688	482.46	107	1768	482.2
28	1592	487.83	68	1690	482.47	108	1770	482.23
29	1613	483.87	69	1692	482.48	109	1772	482.23
30	1614	482.9	70	1694	482.49	110	1774	482.23
31	1616	482.25	71	1696	482.51	111	1776	482.24
32	1618	482.06	72	1698	482.54	112	1778	482.27
33	1620	482.12	73	1700	482.57	113	1780	482.3
34	1622	482.12	74	1702	482.59	114	1782	482.32
35	1624	482.09	75	1704	482.58	115	1784	482.33
36	1626	482.05	76	1706	482.56	116	1786	482.33
37	1628	482.05	77	1708	482.53	117	1788	482.34
38	1630	482.05	78	1710	482.49	118	1790	482.4
39	1632	482.12	79	1712	482.44	119	1792	482.5
40	1634	482.22	80	1714	482.4	120	1794	482.59

Tabela 82 – Características Geométricas da Seção SF35400 do Rio São Francisco - Parte II

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
121	1796	482.59	161	1876	481.43	201	1956	480.46
122	1798	482.51	162	1878	481.47	202	1958	480.27
123	1800	482.33	163	1880	481.51	203	1960	480.14
124	1802	482.34	164	1882	481.54	204	1962	480.1
125	1804	482.35	165	1884	481.17	205	1964	480.05
126	1806	482.4	166	1886	480.61	206	1966	480.01
127	1808	482.46	167	1888	480.65	207	1968	479.98
128	1810	482.52	168	1890	480.97	208	1970	480.01
129	1812	482.49	169	1892	481.3	209	1972	480.04
130	1814	482.36	170	1894	481.3	210	1974	480.07
131	1816	482.33	171	1896	481.24	211	1976	480.11
132	1818	482.3	172	1898	481.18	212	1978	480.14
133	1820	482.28	173	1900	481.14	213	1980	480.14
134	1822	482.27	174	1902	481.14	214	1982	480.14
135	1824	482.29	175	1904	481.15	215	1984	480.24
136	1826	482.31	176	1906	481.15	216	1986	480.46
137	1828	482.33	177	1908	481.05	217	1988	480.67
138	1830	482.33	178	1910	480.93	218	1990	480.88
139	1832	482.34	179	1912	480.85	219	1992	481.1
140	1834	482.33	180	1914	480.85	220	1994	481.31
141	1836	482.29	181	1916	480.86	221	1996	481.84
142	1838	482.16	182	1918	480.86	222	1998	482.46
143	1840	481.98	183	1920	480.84	223	2000	483.87
144	1842	481.87	184	1922	480.77	224	2013.64	487.26
145	1844	481.98	185	1924	480.7	225	2037.74	488.83
146	1846	482.02	186	1926	480.63	226	2075.6	487.59
147	1848	481.97	187	1928	480.55	227	2110.08	487.52
148	1850	481.93	188	1930	480.52	228	2142.85	487.55
149	1852	481.89	189	1932	480.49	229	2177.02	487.47
150	1854	481.85	190	1934	480.47	230	2233.23	487.55
151	1856	481.82	191	1936	480.42	231	2281.77	487.38
152	1858	481.79	192	1938	480.38	232	2339.5	487.15
153	1860	481.77	193	1940	480.36	233	2409.72	487.37
154	1862	481.72	194	1942	480.35	234	2475.82	487.42
155	1864	481.65	195	1944	480.34	235	2571.02	487.33
156	1866	481.59	196	1946	480.38	236	2644.4	487.73
157	1868	481.49	197	1948	480.42	237	2688.44	487.78
158	1870	481.39	198	1950	480.46	238	2722.55	488.34
159	1872	481.37	199	1952	480.49	239	2817.08	489.7
160	1874	481.4	200	1954	480.53	240	2867.42	492.15

Tabela 83 – Características Geométricas da Seção SF32000 do Rio São Francisco - Parte I

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	488.15	44	1136.15	481.36	87	1222.15	480.96
2	188.33	487.62	45	1138.15	481.42	88	1224.15	480.99
3	243.33	487.53	46	1140.15	481.48	89	1226.15	481.01
4	344.89	486.37	47	1142.15	481.46	90	1228.15	481.04
5	407.22	485.94	48	1144.15	481.42	91	1230.15	481.06
6	492.47	486.63	49	1146.15	481.37	92	1232.15	481.09
7	592.49	486.59	50	1148.15	481.31	93	1234.15	481.12
8	695.08	486.73	51	1150.15	481.24	94	1236.15	481.16
9	753.44	487.1	52	1152.15	481.19	95	1238.15	481.13
10	818.65	486.7	53	1154.15	481.15	96	1240.15	481.09
11	899.31	487.23	54	1156.15	481.11	97	1242.15	481.06
12	1024.31	485.13	55	1158.15	481.09	98	1244.15	481.07
13	1074.67	483.65	56	1160.15	481.06	99	1246.15	481.08
14	1076.15	483.58	57	1162.15	481.04	100	1248.15	481.1
15	1078.15	483	58	1164.15	481.04	101	1250.15	481.14
16	1080.15	482.42	59	1166.15	481.04	102	1252.15	481.18
17	1082.15	481.84	60	1168.15	481.04	103	1254.15	481.2
18	1084.15	481.25	61	1170.15	481.02	104	1256.15	481.21
19	1086.15	481.1	62	1172.15	480.96	105	1258.15	481.22
20	1088.15	481	63	1174.15	480.91	106	1260.15	481.23
21	1090.15	480.99	64	1176.15	480.85	107	1262.15	481.23
22	1092.15	480.93	65	1178.15	480.85	108	1264.15	481.23
23	1094.15	480.86	66	1180.15	480.88	109	1266.15	481.23
24	1096.15	480.79	67	1182.15	480.91	110	1268.15	481.24
25	1098.15	480.84	68	1184.15	480.94	111	1270.15	481.28
26	1100.15	480.9	69	1186.15	480.94	112	1272.15	481.39
27	1102.15	480.96	70	1188.15	480.94	113	1274.15	481.5
28	1104.15	480.99	71	1190.15	480.94	114	1276.15	481.53
29	1106.15	480.99	72	1192.15	480.94	115	1278.15	481.54
30	1108.15	481	73	1194.15	480.97	116	1280.15	481.54
31	1110.15	481.01	74	1196.15	481	117	1282.15	481.67
32	1112.15	481.01	75	1198.15	481.02	118	1284.15	481.86
33	1114.15	481.06	76	1200.15	481	119	1286.15	482.01
34	1116.15	481.11	77	1202.15	480.96	120	1288.15	482.04
35	1118.15	481.16	78	1204.15	480.92	121	1290.15	482.1
36	1120.15	481.23	79	1206.15	480.9	122	1292.15	482.19
37	1122.15	481.31	80	1208.15	480.91	123	1294.15	482.27
38	1124.15	481.39	81	1210.15	480.91	124	1296.15	482.42
39	1126.15	481.47	82	1212.15	480.92	125	1298.15	482.59
40	1128.15	481.42	83	1214.15	480.92	126	1300.15	482.76
41	1130.15	481.35	84	1216.15	480.92	127	1302.15	482.84
42	1132.15	481.29	85	1218.15	480.92	128	1304.15	482.83
43	1134.15	481.3	86	1220.15	480.93	129	1306.15	482.82

Tabela 84 – Características Geométricas da Seção SF32000 do Rio São Francisco - Parte II

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
130	1308.15	482.81	172	1392.15	483.34	214	1476.15	482.48
131	1310.15	482.86	173	1394.15	483.34	215	1478.15	482.43
132	1312.15	482.92	174	1396.15	483.33	216	1480.15	482.37
133	1314.15	482.97	175	1398.15	483.32	217	1482.15	482.32
134	1316.15	482.96	176	1400.15	483.29	218	1484.15	482.26
135	1318.15	482.95	177	1402.15	483.26	219	1486.15	482.21
136	1320.15	482.93	178	1404.15	483.24	220	1488.15	482.16
137	1322.15	482.97	179	1406.15	483.2	221	1490.15	482.1
138	1324.15	483.02	180	1408.15	483.16	222	1492.15	482.05
139	1326.15	483.03	181	1410.15	483.12	223	1494.15	482.01
140	1328.15	483.04	182	1412.15	483.08	224	1496.15	482.03
141	1330.15	483.04	183	1414.15	483.05	225	1498.15	482.04
142	1332.15	483.03	184	1416.15	483.03	226	1500.15	482.05
143	1334.15	483.03	185	1418.15	483.03	227	1502.15	482.07
144	1336.15	483.02	186	1420.15	483.02	228	1504.15	482.07
145	1338.15	483.01	187	1422.15	483.02	229	1506.15	482.02
146	1340.15	483.02	188	1424.15	483.02	230	1508.15	481.96
147	1342.15	483.04	189	1426.15	483.02	231	1510.15	481.91
148	1344.15	483.06	190	1428.15	483.02	232	1512.15	481.9
149	1346.15	483.08	191	1430.15	483.03	233	1514.15	481.94
150	1348.15	483.07	192	1432.15	483.04	234	1516.15	481.99
151	1350.15	483.06	193	1434.15	483.04	235	1518.15	482.03
152	1352.15	483.05	194	1436.15	483.05	236	1520.15	482.05
153	1354.15	483.05	195	1438.15	483.06	237	1522.15	482.05
154	1356.15	483.04	196	1440.15	483.06	238	1524.15	482.06
155	1358.15	483.06	197	1442.15	483.06	239	1526.15	482.13
156	1360.15	483.08	198	1444.15	483.06	240	1528.15	482.34
157	1362.15	483.11	199	1446.15	483.06	241	1530.15	482.56
158	1364.15	483.13	200	1448.15	483.06	242	1532.15	482.78
159	1366.15	483.15	201	1450.15	483.06	243	1534.15	482.99
160	1368.15	483.16	202	1452.15	483.02	244	1536.15	483.21
161	1370.15	483.17	203	1454.15	482.97	245	1538.15	483.42
162	1372.15	483.19	204	1456.15	482.92	246	1540.15	483.65
163	1374.15	483.21	205	1458.15	482.88	247	1545.75	484
164	1376.15	483.24	206	1460.15	482.83	248	1853.64	487.24
165	1378.15	483.26	207	1462.15	482.79	249	2010.37	487.04
166	1380.15	483.25	208	1464.15	482.74	250	2167.1	486.48
167	1382.15	483.25	209	1466.15	482.7	251	2323.83	487.77
168	1384.15	483.25	210	1468.15	482.66	252	2480.56	487.53
169	1386.15	483.28	211	1470.15	482.62	253	2637.29	487.31
170	1388.15	483.35	212	1472.15	482.58	-	-	-
171	1390.15	483.35	213	1474.15	482.54	-	-	-

Tabela 85 – Características Geométricas da Seção SF30700 do Rio São Francisco

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	490.09	43	1028.78	480.94	85	1112.78	479.84	127	1196.78	480.27
2	69.58	490.03	44	1030.78	480.92	86	1114.78	479.85	128	1198.78	480.28
3	139.58	489.98	45	1032.78	480.89	87	1116.78	479.86	129	1200.78	480.29
4	207.79	489.94	46	1034.78	480.86	88	1118.78	479.87	130	1202.78	480.3
5	265.91	490	47	1036.78	480.83	89	1120.78	479.88	131	1204.78	480.31
6	306.24	489.96	48	1038.78	480.81	90	1122.78	479.89	132	1206.78	480.32
7	331.9	490	49	1040.78	480.78	91	1124.78	479.9	133	1208.78	480.33
8	390.9	489.98	50	1042.78	480.75	92	1126.78	479.91	134	1210.78	480.34
9	479.9	490.08	51	1044.78	480.72	93	1128.78	479.92	135	1212.78	480.35
10	503.9	490.02	52	1046.78	480.7	94	1130.78	479.93	136	1214.78	480.36
11	539.54	490.04	53	1048.78	480.67	95	1132.78	479.94	137	1216.78	480.44
12	584.75	490.07	54	1050.78	480.64	96	1134.78	479.95	138	1218.78	480.52
13	664.75	490.01	55	1052.78	480.61	97	1136.78	479.96	139	1220.78	480.6
14	701.74	489.97	56	1054.78	480.59	98	1138.78	479.97	140	1222.78	480.68
15	758.32	489.94	57	1056.78	480.56	99	1140.78	479.98	141	1224.78	480.76
16	793.32	490.37	58	1058.78	480.53	100	1142.78	479.99	142	1226.78	480.84
17	862.55	483.99	59	1060.78	480.5	101	1144.78	480	143	1228.78	480.92
18	931.78	485.49	60	1062.78	480.47	102	1146.78	480.01	144	1230.78	480.99
19	981.78	483.97	61	1064.78	480.45	103	1148.78	480.02	145	1232.78	481.07
20	982.78	483.79	62	1066.78	480.42	104	1150.78	480.03	146	1234.78	481.15
21	984.78	483.4	63	1068.78	480.39	105	1152.78	480.04	147	1236.78	481.23
22	986.78	483.31	64	1070.78	480.32	106	1154.78	480.05	148	1238.78	481.36
23	988.78	482.35	65	1072.78	480.26	107	1156.78	480.06	149	1240.78	481.46
24	990.78	481.92	66	1074.78	480.19	108	1158.78	480.07	150	1242.78	481.55
25	992.78	481.49	67	1076.78	480.12	109	1160.78	480.08	151	1244.78	481.58
26	994.78	481.3	68	1078.78	480.05	110	1162.78	480.09	152	1246.78	481.61
27	996.78	481.33	69	1080.78	479.98	111	1164.78	480.1	153	1248.78	481.64
28	998.78	481.36	70	1082.78	479.92	112	1166.78	480.11	154	1250.78	481.82
29	1000.78	481.33	71	1084.78	479.85	113	1168.78	480.12	155	1252.78	482.1
30	1002.78	481.3	72	1086.78	479.78	114	1170.78	480.13	156	1254.78	482.35
31	1004.78	481.28	73	1088.78	479.71	115	1172.78	480.15	157	1256.78	482.58
32	1006.78	481.25	74	1090.78	479.72	116	1174.78	480.16	158	1258.78	482.81
33	1008.78	481.22	75	1092.78	479.73	117	1176.78	480.17	159	1260.78	483.36
34	1010.78	481.19	76	1094.78	479.74	118	1178.78	480.18	160	1262.78	483.97
35	1012.78	481.17	77	1096.78	479.75	119	1180.78	480.19	161	1373.41	490.37
36	1014.78	481.14	78	1098.78	479.76	120	1182.78	480.2	162	1484.41	490.23
37	1016.78	481.11	79	1100.78	479.77	121	1184.78	480.21	163	1595.21	490.08
38	1018.78	481.08	80	1102.78	479.79	122	1186.78	480.22	164	1706.01	490.5
39	1020.78	481.06	81	1104.78	479.8	123	1188.78	480.23	165	1816.81	487.62
40	1022.78	481.03	82	1106.78	479.81	124	1190.78	480.24	166	1927.61	488.19
41	1024.78	481	83	1108.78	479.82	125	1192.78	480.25	167	2038.41	488.06
42	1026.78	480.97	84	1110.78	479.83	126	1194.78	480.26	-	-	-

Tabela 86 – Características Geométricas da Seção SF29000 do Rio São Francisco - Parte I

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
1	0	504.51	35	421.92	481.51	69	489.92	481.79	103	557.92	481.7
2	23.44	501.04	36	423.92	481.51	70	491.92	481.75	104	559.92	481.68
3	45.79	497.93	37	425.92	481.54	71	493.92	481.71	105	561.92	481.66
4	67.01	494.96	38	427.92	481.58	72	495.92	481.68	106	563.92	481.64
5	93.34	492.9	39	429.92	481.62	73	497.92	481.65	107	565.92	481.62
6	113.34	492.51	40	431.92	481.65	74	499.92	481.68	108	567.92	481.6
7	142.34	488.56	41	433.92	481.69	75	501.92	481.7	109	569.92	481.6
8	164.56	487.45	42	435.92	481.71	76	503.92	481.73	110	571.92	481.6
9	190.77	485.38	43	437.92	481.73	77	505.92	481.75	111	573.92	481.6
10	220.77	485.54	44	439.92	481.74	78	507.92	481.78	112	575.92	481.56
11	245.1	485.61	45	441.92	481.76	79	509.92	481.8	113	577.92	481.5
12	255.35	485.57	46	443.92	481.77	80	511.92	481.83	114	579.92	481.45
13	291.35	485.76	47	445.92	481.77	81	513.92	481.84	115	581.92	481.39
14	317.66	485.79	48	447.92	481.77	82	515.92	481.86	116	583.92	481.44
15	347.68	484.69	49	449.92	481.77	83	517.92	481.87	117	585.92	481.49
16	370.29	484.98	50	451.92	481.77	84	519.92	481.89	118	587.92	481.55
17	382.19	484.99	51	453.92	481.77	85	521.92	481.9	119	589.92	481.6
18	387.88	483.87	52	455.92	481.77	86	523.92	481.91	120	591.92	481.66
19	389.92	483.8	53	457.92	481.8	87	525.92	481.92	121	593.92	481.71
20	391.92	483.22	54	459.92	481.83	88	527.92	481.93	122	595.92	481.77
21	393.92	482.59	55	461.92	481.86	89	529.92	481.94	123	597.92	481.8
22	395.92	481.96	56	463.92	481.9	90	531.92	481.95	124	599.92	481.83
23	397.92	481.5	57	465.92	481.93	91	533.92	481.96	125	601.92	481.85
24	399.92	481.48	58	467.92	481.96	92	535.92	481.94	126	603.92	481.87
25	401.92	481.45	59	469.92	481.96	93	537.92	481.92	127	605.92	481.9
26	403.92	481.43	60	471.92	481.96	94	539.92	481.89	128	607.92	481.88
27	405.92	481.42	61	473.92	481.95	95	541.92	481.87	129	609.92	481.86
28	407.92	481.43	62	475.92	481.95	96	543.92	481.85	130	611.92	481.83
29	409.92	481.45	63	477.92	481.95	97	545.92	481.83	131	613.92	481.8
30	411.92	481.46	64	479.92	481.95	98	547.92	481.81	132	615.92	481.81
31	413.92	481.48	65	481.92	481.94	99	549.92	481.79	133	617.92	481.87
32	415.92	481.49	66	483.92	481.9	100	551.92	481.76	134	619.92	481.93
33	417.92	481.49	67	485.92	481.87	101	553.92	481.74	135	621.92	481.99
34	419.92	481.5	68	487.92	481.83	102	555.92	481.72	136	623.92	482.05

Tabela 87 – Características Geométricas da Seção SF29000 do Rio São Francisco - Parte II

n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)	n°	h(m)	z(m)
137	625.92	482.1	171	693.92	482.24	205	761.92	482.57	239	829.92	482.65
138	627.92	481.95	172	695.92	482.11	206	763.92	482.59	240	831.92	482.69
139	629.92	481.94	173	697.92	482.11	207	765.92	482.62	241	833.92	482.72
140	631.92	481.89	174	699.92	482.13	208	767.92	482.61	242	835.92	482.76
141	633.92	481.87	175	701.92	482.17	209	769.92	482.57	243	837.92	482.8
142	635.92	481.74	176	703.92	482.22	210	771.92	482.53	244	839.92	482.84
143	637.92	481.4	177	705.92	482.27	211	773.92	482.5	245	841.92	482.87
144	639.92	481.47	178	707.92	482.33	212	775.92	482.46	246	843.92	482.91
145	641.92	481.54	179	709.92	482.38	213	777.92	482.42	247	845.92	482.96
146	643.92	481.62	180	711.92	482.34	214	779.92	482.39	248	847.92	483.02
147	645.92	481.69	181	713.92	482.24	215	781.92	482.35	249	849.92	483.08
148	647.92	481.72	182	715.92	482.21	216	783.92	482.31	250	851.92	483.14
149	649.92	481.75	183	717.92	482.35	217	785.92	482.28	251	853.92	483.2
150	651.92	481.77	184	719.92	482.37	218	787.92	482.24	252	855.92	483.26
151	653.92	481.8	185	721.92	482.34	219	789.92	482.26	253	857.92	483.32
152	655.92	481.83	186	723.92	482.31	220	791.92	482.28	254	859.92	483.38
153	657.92	481.84	187	725.92	482.28	221	793.92	482.31	255	861.92	483.42
154	659.92	481.8	188	727.92	482.25	222	795.92	482.33	256	863.92	483.47
155	661.92	481.75	189	729.92	482.22	223	797.92	482.36	257	865.92	483.52
156	663.92	481.7	190	731.92	482.27	224	799.92	482.38	258	867.92	483.57
157	665.92	481.66	191	733.92	482.38	225	801.92	482.4	259	869.92	483.62
158	667.92	481.61	192	735.92	482.41	226	803.92	482.43	260	871.92	483.67
159	669.92	481.55	193	737.92	482.41	227	805.92	482.46	261	873.92	483.72
160	671.92	481.49	194	739.92	482.41	228	807.92	482.5	262	875.92	483.77
161	673.92	481.42	195	741.92	482.42	229	809.92	482.54	263	877.92	483.82
162	675.92	481.38	196	743.92	482.42	230	811.92	482.58	264	879.92	483.87
163	677.92	481.38	197	745.92	482.42	231	813.92	482.62	265	897.89	484.81
164	679.92	481.52	198	747.92	482.43	232	815.92	482.62	266	915.84	484
165	681.92	481.75	199	749.92	482.43	233	817.92	482.62	267	933.79	487.25
166	683.92	481.47	200	751.92	482.44	234	819.92	482.62	268	951.74	486.89
167	685.92	481.61	201	753.92	482.46	235	821.92	482.62	269	969.69	486.85
168	687.92	481.91	202	755.92	482.49	236	823.92	482.62	270	987.64	486.73
169	689.92	482.2	203	757.92	482.51	237	825.92	482.62	271	1005.59	486.27
170	691.92	482.38	204	759.92	482.54	238	827.92	482.62	272	1279.92	490







Tabela 91 – Parâmetros Fixos de Resistência Superficial (RS) para o MGB-IPH

Unidade de Resposta Hidrológica	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Agricultura em Solos profundos	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Floresta em solos profundos	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Agricultura em Solo Médio	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Floresta em solo médio	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Áreas Impermeáveis	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 92 – Parâmetros Calibráveis para o MGB: CI, CS, CB e QB

Parâmetro	Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3	Bacia 4
CI	12	4.41	9.94	8
CS	120	172	95.44	100
CB	4000	2426	648	2000
QB	0.01	0.01	0.01	0.01
Parâmetro	Bacia 5	Bacia 6	Bacia 7	Bacia 8
CI	15.2	29.07	5	6.01
CS	134.4	104.6	50	108.2
CB	1498	2078	2000	4141.2
QB	0.01	0.01	0.01	0.01
Parâmetro	Bacia 9	Bacia 10	Bacia 11	Bacia 12
CI	17.82	3.61	3.61	2.3
CS	198.4	183.9	183.9	128
CB	9817.2	1248	1248	2640
QB	0.01	0.01	0.01	0.01
Parâmetro	Bacia 13	-	-	-
CI	1.81	-	-	-
CS	99.2	-	-	-
CB	1190.4	-	-	-
QB	0.01	-	-	-

Tabela 93 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para as Bacia 1, 2, 3 e 4

Bacia 1							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	313	0.2	0.78	4.72	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	313	0.2	0.78	4.72	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	313	0.2	0.78	4.72	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	250	0.26	1.99	4.72	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	250	0.26	1.99	4.72	0.6	0	0
Floresta em solo médio	250	0.26	1.99	4.72	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	20	0.26	1.99	4.72	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 2							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	710	0.18	0.93	1.91	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	710	0.18	0.93	1.91	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	710	0.18	0.93	1.91	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	164	0.45	2.02	1.91	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	164	0.45	2.02	1.91	0.6	0	0
Floresta em solo médio	164	0.45	2.02	1.91	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	20	0.45	2.02	1.91	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 3							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	948	0.44	1.77	3.73	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	948	0.44	1.77	3.73	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	948	0.44	1.77	3.73	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	158.5	0.53	0.6	3.73	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	158.5	0.53	0.6	3.73	0.6	0	0
Floresta em solo médio	158.5	0.53	0.6	3.73	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	13.8	0.32	0.6	3.73	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 4							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	600	0.13	0.57	3.72	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	600	0.13	0.57	3.72	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	600	0.13	0.57	3.72	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	360	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	360	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Floresta em solo médio	360	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	20	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 94 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para a Bacia 5, 6, 7 e 8

Bacia 5							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	282.5	0.5	2	30	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	282.5	0.5	2	30	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	282.5	0.5	2	30	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	246.6	0.35	4.52	30	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	246.6	0.35	4.52	30	0.6	0	0
Floresta em solo médio	246.6	0.35	4.52	30	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	8	0.38	4.52	4.87	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 6							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	415.3	0.25	0.56	13.13	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	415.3	0.25	0.56	13.13	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	415.3	0.25	0.56	13.13	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	245.6	0.23	2.68	13.13	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	245.6	0.23	2.68	13.13	0.6	0	0
Floresta em solo médio	245.6	0.23	2.68	13.13	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	45.4	0.23	2.68	13.13	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 7							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	300	0.35	2.34	9.87	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	300	0.35	2.34	9.87	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	300	0.35	2.34	9.87	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	100	0.35	2.86	9.87	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	100	0.35	2.86	9.87	0.6	0	0
Floresta em solo médio	100	0.35	2.86	9.87	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	40	0.35	0.86	1.87	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 8							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	762.6	0.15	1.34	4.87	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	762.6	0.15	1.34	4.87	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	762.6	0.15	1.34	4.87	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	263.1	0.18	0.86	4.87	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	263.1	0.18	0.86	4.87	0.6	0	0
Floresta em solo médio	263.1	0.18	0.86	4.87	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	72.5	0.18	0.86	4.87	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 95 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para a Bacia 9, 10, 11, 12

Bacia 9							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	1065.6	0.13	0.57	3.72	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	1065.6	0.13	0.57	3.72	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	1065.6	0.13	0.57	3.72	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	535.2	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	535.2	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Floresta em solo médio	535.2	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	37.9	0.18	1.24	3.72	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 10							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	355.8	0.16	1.84	6.9	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	355.8	0.16	1.84	6.9	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	355.8	0.16	1.84	6.9	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	356.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	356.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Floresta em solo médio	356.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	66.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 11							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	355.8	0.16	1.84	6.9	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	355.8	0.16	1.84	6.9	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	355.8	0.16	1.84	6.9	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	356.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	356.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Floresta em solo médio	356.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	66.4	0.44	1.22	6.9	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0
Bacia 12							
Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	562.7	0.21	1.82	2.4	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	562.7	0.21	1.82	2.4	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	488.3	0.21	1.82	2.4	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	196.1	0.24	0.58	2.4	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	196.1	0.24	0.58	2.4	0.6	0	0
Floresta em solo médio	196.1	0.24	0.58	2.4	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	12.7	0.24	0.58	2.4	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 96 – Parâmetros Calibráveis Wm, b, Kbas, Kint, XL, CAP e Wc para a Bacia 13

Unidade de resposta Hidrológica	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Agricultura em Solos profundos	684.6	0.14	1.8	1.61	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solos profundos	469.8	0.14	1.8	1.61	0.6	0	0
Floresta em solos profundos	594	0.14	1.8	1.61	0.6	0	0
Agricultura em Solo Médio	314.7	0.14	1.8	1.61	0.6	0	0
Campos, Cerrado e Estepes em solo médio	313.2	0.14	1.8	1.61	0.6	0	0
Floresta em solo médio	217.8	0.14	1.8	1.61	0.6	0	0
Áreas Semi-Impermeáveis	30.1	0.14	1.8	1.61	0.6	0	0
Água	0	0	0	0	0	0	0





## APÊNDICE C – Geometria dos canais da configuração do SOBEK

Tabela 97 – Configuração Geométrica de nós para o SOBEK - Rio Abaetés

Localização (m)	Identificação do Nó	Transecto Equivalente	Largura Máxima da Seção (m)	Manning ( $s/m^{-1/3}$ )
0.000	PBR040	-	-	-
1.000	P_35200_1	RA35200	89.610	0.003
1189.600	P_34000_1	RA34000	140.020	0.003
5048.120	P_30100_1	RA30100	105.000	0.03
10984.300	P_24200_1	RA24200	136.000	0.03
14725.520	P_20400_1	RA20400	131.000	0.025
15808.070	P_19300_1	RA19300	110.000	0.025
18655.860	P_16500_1	RA16500	102.000	0.025
22761.770	P_12400_1	RA12400	124.200	0.025
35120.560	P_0_1	RA0	601.490	0.025

Tabela 98 – Configuração Geométrica de nós para o SOBEK - Rio São Francisco 1

Localização (m)	Identificação do Nó	Transecto Equivalente	Largura Máxima da Seção (m)	Manning ( $s/m^{-1/3}$ )
0.000	TresMarias	-	-	-
1.000	P_159600_2	SF159600	348.110	0.02
625.600	P_156000_2	SF156000	331.970	0.02
4284.450	P_153200_2	SF153200	374.690	0.02
7040.200	P_148800_2	SF148800	357.660	0.025
11456.280	P_144800_2	SF144800	366.910	0.025
15487.580	P_142200_2	SF142200	345.460	0.02
18047.300	P_137600_2	SF137600	349.820	0.025
22687.350	P_134000_2	SF134000	315.750	0.02
26260.140	P_130300_2	SF130300	318.560	0.025
29914.630	P_127210_2	SF127210	592.590	0.025

Tabela 99 – Configuração Geométrica de nós para o SOBEK - Rio São Francisco 2

Localização (m)	Identificação do Nó	Transecto Equivalente	Largura Máxima da Seção (m)	Manning ( $s/m^{-1/3}$ )
0.000	P_127210_2	SF127210	592.590	0.025
1.000	P_127190_3	SF127190	592.590	0.025
3141.930	P_122100_3	SF122100	340.590	0.025
8233.590	P_118800_3	SF118800	335.120	0.025
11533.170	P_116400_3	SF116400	296.090	0.015
13895.210	P_111700_3	SF111700	391.640	0.015
18678.440	P_109400_3	SF109400	389.700	0.025
20972.120	P_102500_3	SF102500	323.000	0.025
27853.150	P_95600_3	SF95600	320.390	0.023
34707.440	P_92600_3	SF92600	375.810	0.015
37722.300	P_86600_3	SF86600	463.320	0.02
43730.310	P_83200_3	SF83200	297.490	0.02
47128.040	P_77200_3	SF77200	597.910	0.023
53136.050	P_71100_3	SF71100	330.880	0.023
59215.690	P_68200_3	SF68200	306.770	0.015
62175.190	P_63800_3	SF63800	397.090	0.015
66548.170	P_57000_3	SF57000	338.490	0.023
73377.580	P_53400_3	SF53400	1645.000	0.023
76933.500	P_44700_3	SF44700	1337.260	0.023
85664.660	P_38800_3	SF38800	1501.540	0.023
91495.370	P_35400_3	SF35400	1276.760	0.023
94941.360	P_32000_3	SF32000	1700.330	0.015
98320.540	P_30700_3	SF30700	2105.770	0.015
99665.450	P_29000_3	SF29000	1250.000	0.03
99666.450	PiraporaPonte	-	-	-

## APÊNDICE D – Geometria dos canais da configuração do SPRNT

Tabela 100 – SPRNT: Configuração completa do rio Abaetés

Seção Transversal	Comprimento (m)	Manning (n)	z0 (m)	sR (m/m)	zR	hR (m)
RA35200	1189.6	0.035	543.95	0.001255639	542.4562919	1.49
RA34000	3858.52	0.030	543.21	0.001255639	538.3650919	4.84
RA30100	5936.18	0.040	533.26	0.001255639	525.806301	7.45
RA24200	3741.22	0.045	520.06	0.001255639	515.3623783	4.70
RA20400	1082.55	0.040	518.99	0.001255639	517.630708	1.36
RA19300	2847.79	0.030	514.71	0.001255639	511.1342039	3.58
RA16500	4105.91	0.035	510.51	0.001255639	505.3544593	5.16
RA12400	12359.79	0.040	509.25	0.001255639	493.7305658	15.52
RA0	0	0.040	499.85	0.001255639	499.85	0.00

Tabela 101 – SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 1

Seção Transversal	Comprimento (m)	Manning (n)	z0 (m)	sR (m/m)	zR	hR (m)
SF159600	625.6	0.040	509.07	0.0003082	508.87719	0.19
SF156000	3658.85	0.040	509.59	0.0003082	508.4623421	1.13
SF153200	2755.75	0.040	508.67	0.0003082	507.8206776	0.85
SF148800	4416.08	0.025	504.82	0.0003082	503.4589637	1.36
SF144800	4031.3	0.025	504.10	0.0003082	502.857553	1.24
SF142200	2559.72	0.020	502.53	0.0003082	501.7410941	0.79
SF137600	4640.05	0.025	502.00	0.0003082	500.5699362	1.43
SF134000	3572.79	0.020	499.83	0.0003082	498.7288658	1.10
SF130300	3655.49	0.025	500.28	0.0003082	499.1533776	1.13
SF127210	0	0.030	499.85	0.0003082	499.85	0.00

Tabela 102 – SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 2

Seção Transversal	Comprimento (m)	Manning (n)	z0 (m)	sR (m/m)	zR	hR (m)
SF127190	3141.93	0.030	499.85	0.000244826	499.0807744	0.77
SF122100	5091.66	0.030	497.92	0.000244826	496.6734302	1.25
SF118800	3299.58	0.035	495.86	0.000244826	495.0521776	0.81
SF116400	2362.04	0.030	493.89	0.000244826	493.3117116	0.58
SF111700	4783.23	0.030	494.83	0.000244826	493.6589418	1.17
SF109400	2293.68	0.025	493.42	0.000244826	492.8584479	0.56
SF102500	6881.03	0.025	492.65	0.000244826	490.9653462	1.68
SF95600	6854.29	0.023	490.14	0.000244826	488.4618928	1.68
SF92600	3014.86	0.015	490.14	0.000244826	489.4018844	0.74
SF86600	6008.01	0.020	489.22	0.000244826	487.749084	1.47
SF83200	3397.73	0.020	486.90	0.000244826	486.068148	0.83
SF77200	6008.01	0.023	487.12	0.000244826	485.649084	1.47
SF71100	6079.64	0.030	485.15	0.000244826	483.6615472	1.49
SF68200	2959.5	0.015	484.65	0.000244826	483.925438	0.72
SF63800	4372.98	0.020	485.17	0.000244826	484.0993816	1.07
SF57000	6829.41	0.025	483.09	0.000244826	481.4179841	1.67
SF53400	3555.92	0.030	483.21	0.000244826	482.339419	0.87
SF44700	8731.16	0.030	482.23	0.000244826	480.0923866	2.14
SF38800	5830.71	0.035	481.03	0.000244826	479.6024916	1.43
SF35400	3445.99	0.035	479.98	0.000244826	479.1363327	0.84
SF32000	3379.18	0.040	480.79	0.000244826	479.9626895	0.83
SF30700	1344.91	0.030	479.71	0.000244826	479.3807313	0.33
SF29000	1662.02	0.030	481.38	0.000244826	480.9730946	0.41

Tabela 103 – SPRNT: Configuração reduzida do rio Abaetés

Seção Transversal	Comprimento (m)	Manning (n)	z0 (m)	sR (m/m)	zR	hR (m)
PBR040	10984.3	0.001255639	0.035945741	530.1576847	13.79	
RA24200	11777.47	0.001255639	0.037427177	505.2717495	14.79	
RA12400	12359.79	0.001255639	0.040	493.7305658	15.52	
RA0	1.0	0.001255639	0.040	499.85	0.00	

Tabela 104 – SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 1

Seção Transversal	Comprimento (m)	Manning (n)	z0 (m)	sR (m/m)	zR	hR (m)
TMARIAS	11456.28	0.0003082	0.034217914	505.5391734	3.53	
SF144800	11231.07	0.0003082	0.023860429	500.6385832	3.46	
SF134000	7228.28	0.0003082	0.023	497.6022434	2.23	
SF127210	1.0	0.0003082	0.030	499.85	0.00	

Tabela 105 – SPRNT: Configuração completa do rio São Francisco 2

Seção Transversal	Comprimento (m)	Manning (n)	z0 (m)	sR (m/m)	zR	hR (m)
SF127190	11533.17	0.000244826	0.031430474	497.0263822	2.82	
SF116400	9438.95	0.000244826	0.028784992	491.5791013	2.31	
SF102500	13735.32	0.000244826	0.024	489.287239	3.36	
SF92600	12420.6	0.000244826	0.018786347	487.0991164	3.04	
SF77200	12087.65	0.000244826	0.027	484.1606312	2.96	
SF68200	7332.48	0.000244826	0.018	482.8548196	1.80	
SF57000	10385.33	0.000244826	0.027	480.5474031	2.54	
SF44700	8731.16	0.000244826	0.030	480.0923866	2.14	
SF38800	9276.7	0.000244826	0.035	478.7588243	2.27	
SF32000	6386.11	0.000244826	0.035291453	479.2265154	1.56	
PIRAPORAPTE	1.0	0.000244826	0.03	480.97	0.41	



# APÊNDICE E – RTC-Tools - Geometria para Onda Difusiva de Malha Grosseira do RTC-Tools

Tabela 106 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção PBR040 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
544.67	59.76	335913.0581	548.15	93.06	5426567.85
544.79	61.74	456511.0936	548.54	96.63	6056756.05
544.9	66.76	569695.6594	548.91	100.13	6643692.81
544.99	67.14	679979.1339	549.25	103.56	7256671.779
545.21	67.5	933153.2761	549.58	107.26	7836828.698
545.4	67.83	1162822.147	549.91	110.81	8415406.16
545.56	68.14	1485035.696	550.2	114.11	8995414.518
545.7	68.44	1748678.125	550.51	124.13	9592512.134
545.84	68.72	1976141.699	550.8	165.03	10290276.53
545.97	69	2170507.9	551.07	180.78	11043076.54
546.1	69.28	2354585.076	551.36	207.75	11677788.72
546.21	69.54	2532500.971	551.73	242.41	12343105.61
546.33	69.79	2709415.308	552.06	428.96	13002754.84
546.45	70.13	2877326.411	552.25	434.2	13661821.1
546.56	70.64	3043021.111	552.35	439.41	14237795.34
546.66	71.18	3200342.679	553.64	445.51	15145160.31
546.77	71.68	3357343.246	553.79	449.67	15757700.15
546.87	72.14	3508610.956	553.94	454.28	16354201.84
546.98	72.68	3658630.017	554.11	459.53	16937137.79
547.08	75.54	3799975.905	554.23	464.31	17533424.63
547.17	75.87	3943415.284	554.36	468.54	18134336.24
547.28	76.52	4087582.337	554.51	472.58	18688817.2
547.48	80.82	4366390.456	554.64	507.65	19283493.56
547.57	85.56	4504766.163	554.76	508.66	19813158.57
547.74	89.43	4779093.965	554.87	509.68	20401123

Tabela 107 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção TMarias - Onda Difusiva Grosseira (DW30km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
509.57	117.58	498233.5486	511.68	243.52	8573270.681
509.64	119.11	687617.3537	511.86	247.54	9566670.044
509.7	120.59	869309.1256	512.02	250.39	10494601.94
509.76	121.81	1042764.022	512.18	253.13	11512656.03
509.89	126.48	1459870.476	512.33	255.54	12449388.6
510.01	127.68	1805441.019	512.47	256.18	13317990.25
510.11	130.1	2136237.187	512.61	256.57	14173979.96
510.21	133.74	2443259.169	512.75	259.28	14988216.55
510.31	137.21	2751456.914	512.88	261.8	15822516.81
510.4	143.73	3039536.23	513.01	264.2	16608762.99
510.48	149.76	3320787.158	513.14	265.53	17373920.42
510.57	156.91	3610911.386	513.27	266.8	18104781.16
510.64	160.04	3892966.168	513.4	271.62	18839263.75
510.71	162.42	4162271.622	513.52	275.24	19554027.96
510.78	164.66	4451658.091	513.64	277.94	20257044.26
510.85	169.65	4726404.61	513.75	280.12	20982784.97
510.92	177.33	4991298.935	513.86	281.82	21643518.57
510.99	184.45	5325087.223	513.98	283.47	22341430.54
511.06	191.47	5589295.468	514.08	284.89	23025335.47
511.12	198.5	5858290.117	514.18	286.36	23723387.01
511.18	202.61	6111677.19	514.28	287.8	24388683.4
511.25	205.72	6365021.593	514.37	289.16	25040193.72
511.37	234.82	6826925.465	514.48	290.71	25719803.15
511.41	236.23	7054583.92	514.57	292	26399782.57
511.49	238.66	7473708.948	514.67	293.46	27039689.7



Tabela 108 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
500.6	35.59	1248721.722	503.03	287.37	20714925.17
500.81	70.62	1696714.599	503.21	303.32	23119875.37
500.9	73.67	2122905.957	503.42	358.21	25443997.07
500.98	75.17	2527170.116	503.56	366.87	27611518.66
501.16	79.14	3448982.466	503.66	368.51	29706839.91
501.33	84.29	4292897.661	503.8	379.01	31793847.47
501.47	89.58	5187421.759	503.93	394.81	33814355.94
501.65	106.89	6041831.186	504.05	410.4	35772226.39
501.85	163.51	6863381.911	504.18	436.21	37766649.45
501.93	173.11	7623962.06	504.31	463.6	39688578.77
502.01	180.51	8369965.793	504.41	493.98	41590662.45
502.1	198.91	9191128.902	504.5	495.41	43450125.28
502.18	210.9	9894146.199	504.58	496.59	45236375.59
502.24	218.37	10553575.41	504.66	497.88	46984943.94
502.29	224.52	11182950.67	504.73	498.94	48709253.76
502.35	229.6	11816468.19	504.8	500.07	50443463.59
502.4	233.72	12417833.7	504.87	501.23	52157944.86
502.46	242.47	12992705.4	504.94	502.35	53790671.01
502.5	246.01	13600191.28	505.01	503.45	55476754.52
502.55	249.56	14134974.52	505.08	504.52	57059075.9
502.59	253.11	14705499.44	505.15	505.56	58745783.94
502.64	256.83	15256613.68	505.22	506.6	60485926.22
502.73	263.12	16349914.55	505.28	507.6	62216528.52
502.76	264.52	16876331.44	505.35	508.7	63770294.48
502.84	268.42	17951478.17	505.42	509.74	67305408.87

Tabela 109 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
490.64	93.54	1005410.153	492.37	249.04	15994086.47
490.72	101.02	1392904.394	492.54	250.64	17830917.76
490.8	106.79	1744219.718	492.69	251.69	19541343.84
490.87	116.47	2087736.921	492.85	252.79	21194293.65
491.04	175.2	2842668.151	493	255.37	22785104.58
491.15	220.19	3522177.677	493.15	256.5	24304343.39
491.23	227.67	4167304.127	493.28	257.55	25765687.28
491.29	228.5	4761541.529	493.42	258.24	27215908.2
491.36	229.47	5305511.471	493.55	258.93	28620331.13
491.41	230.45	5884651.824	493.67	259.59	30005498.41
491.47	231.58	6440143.681	493.8	260.25	31375349.39
491.53	233.46	7007220.11	493.92	261.05	32720833.89
491.58	235.44	7549761.673	494.04	263.59	34055224.9
491.63	236.82	8098254.499	494.16	264.46	35360493.43
491.68	238.21	8627781.003	494.28	265.31	36631964.93
491.73	239.44	9144231.96	494.39	266.15	37927941.53
491.77	240.42	9613618.115	494.5	266.97	39159927.27
491.82	241.36	10070581.59	494.61	267.78	40409416.49
491.86	242.29	10520229.02	494.72	268.58	41620567.37
491.91	243.2	10980119.44	494.82	269.37	42832330.06
491.95	244.12	11417528.19	494.92	270.14	44054372.69
491.99	244.59	11850311.19	495.03	270.9	45202904.3
492.07	245.45	12697806.9	495.13	271.66	46383101.24
492.11	245.87	13101841.85	495.23	272.4	47508050.8
492.18	246.69	14077244.1	495.33	273.11	48676178.79

Tabela 110 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03 - Onda Difusiva Grosseira (DW30km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
483.07	80.27	592464.2766	485.13	335.41	10469364.14
483.16	81.9	807431.7326	485.28	337.89	11807952.04
483.24	83.25	1006126.841	485.41	338.82	12960270.66
483.32	85.8	1186617.383	485.54	339.73	14047508.07
483.49	95.05	1602750.177	485.66	340.6	15092302.62
483.66	112.13	2012320.739	485.77	341.32	16073705.46
483.78	121.95	2391599.527	485.89	342.37	17063069.87
483.93	152.7	2805499.803	486	343.35	18018726.27
484.03	167.64	3162367.863	486.1	344.25	18935361.54
484.14	200.55	3543733.856	486.2	345.15	19843154.52
484.22	215.85	3895603.484	486.29	346	20718999.44
484.28	227.34	4225305.112	486.39	346.91	21628550.22
484.35	238.83	4594357.299	486.49	347.81	22502462.04
484.4	247.84	4951600.154	486.59	348.7	23353196.63
484.46	257.7	5412766.875	486.7	349.62	24246080.84
484.52	268.59	5791447.304	486.78	350.38	25057385.01
484.56	275.21	6139732.102	486.88	351.24	25878192.73
484.61	280.19	6500219.531	486.97	352.05	26704534.85
484.65	284.74	6809577.256	487.06	352.85	27526277.05
484.7	290.1	7160948.809	487.14	353.55	28317235.42
484.74	294.93	7478390.888	487.23	354.4	29173594.37
484.78	299.45	7782944.256	487.32	355.16	30016158.15
484.85	306.76	8330839.071	487.4	355.91	30828767.57
484.89	309.58	8609507.898	487.48	356.65	31598180.6
484.96	313.95	9159551.8	487.57	357.46	32412265.2

Tabela 111 – Valores de Cota e Largura da Seção para a Seção Pirapora - Onda Difusiva Grosseira (DW30km)

Cota(m)	Largura (m)	Cota (m)	Largura (m)
481.79	173.43	483.02	455.41
481.86	213.95	483.14	459.6
481.91	245.25	483.25	463.59
481.95	275.31	483.35	467.43
482.02	289.04	483.45	472.02
482.09	292.98	483.55	476.25
482.15	300.07	483.64	480.31
482.21	303.87	483.73	484.28
482.26	318.55	483.82	488.75
482.32	336.16	483.91	492.95
482.37	354.35	483.99	494.94
482.42	372.46	484.07	498.82
482.46	390.3	484.15	502.92
482.5	396.53	484.23	506.94
482.54	404.08	484.3	510.89
482.58	410.5	484.37	514.59
482.61	417.84	484.45	518.58
482.65	436.11	484.52	522.11
482.68	437.77	484.59	525.76
482.71	439.65	484.66	529.51
482.74	441.34	484.73	537.23
482.77	442.83	484.8	548.76
482.82	445.73	484.88	557.45
482.85	447.26	484.94	565.37
482.9	450.42	485.02	582.83

# APÊNDICE F – RTC-Tools - Geometria para Onda Difusiva Malha Refinada do RTC-Tools

Tabela 112 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção PBR040 - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
544.67	59.76	335913.0581	548.15	93.06	5426567.85
544.79	61.74	456511.0936	548.54	96.63	6056756.05
544.9	66.76	569695.6594	548.91	100.13	6643692.81
544.99	67.14	679979.1339	549.25	103.56	7256671.779
545.21	67.5	933153.2761	549.58	107.26	7836828.698
545.4	67.83	1162822.147	549.91	110.81	8415406.16
545.56	68.14	1485035.696	550.2	114.11	8995414.518
545.7	68.44	1748678.125	550.51	124.13	9592512.134
545.84	68.72	1976141.699	550.8	165.03	10290276.53
545.97	69	2170507.9	551.07	180.78	11043076.54
546.1	69.28	2354585.076	551.36	207.75	11677788.72
546.21	69.54	2532500.971	551.73	242.41	12343105.61
546.33	69.79	2709415.308	552.06	428.96	13002754.84
546.45	70.13	2877326.411	552.25	434.2	13661821.1
546.56	70.64	3043021.111	552.35	439.41	14237795.34
546.66	71.18	3200342.679	553.64	445.51	15145160.31
546.77	71.68	3357343.246	553.79	449.67	15757700.15
546.87	72.14	3508610.956	553.94	454.28	16354201.84
546.98	72.68	3658630.017	554.11	459.53	16937137.79
547.08	75.54	3799975.905	554.23	464.31	17533424.63
547.17	75.87	3943415.284	554.36	468.54	18134336.24
547.28	76.52	4087582.337	554.51	472.58	18688817.2
547.48	80.82	4366390.456	554.64	507.65	19283493.56
547.57	85.56	4504766.163	554.76	508.66	19813158.57
547.74	89.43	4779093.965	554.87	509.68	20401123

Tabela 113 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção Três Marias - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
509.57	117.58	155580.783	511.68	243.52	2823818.848
509.64	119.11	210903.7875	511.86	247.54	3149277.046
509.7	120.59	269342.9745	512.02	250.39	3446851.653
509.76	121.81	323499.006	512.18	253.13	3734777.555
509.89	126.48	471445.786	512.33	255.54	4009546.807
510.01	127.68	582432.0515	512.47	256.18	4272279.479
510.11	130.1	699615.634	512.61	256.57	4534341.025
510.21	133.74	801097.5175	512.75	259.28	4785965.938
510.31	137.21	904334.178	512.88	261.8	5039628.95
510.4	143.73	998874.6325	513.01	264.2	5284645.926
510.48	149.76	1091827.969	513.14	265.53	5539203.266
510.57	156.91	1190010.188	513.27	266.8	5764641.952
510.64	160.04	1282447.333	513.4	271.62	6003882.426
510.71	162.42	1371292.497	513.52	275.24	6235520.117
510.78	164.66	1455697.97	513.64	277.94	6463367.957
510.85	169.65	1536732.874	513.75	280.12	6685798.815
510.92	177.33	1618653.618	513.86	281.82	6894419.571
510.99	184.45	1697418.969	513.98	283.47	7122239.033
511.06	191.47	1790426.778	514.08	284.89	7334323.237
511.12	198.5	1894538.173	514.18	286.36	7544406.053
511.18	202.61	1980715.712	514.28	287.8	7751919.878
511.25	205.72	2062957.969	514.37	289.16	7946133.512
511.37	234.82	2204827.822	514.48	290.71	8161822.062
511.41	236.23	2282566.867	514.57	292	8361832.231
511.49	238.66	2418180.837	514.67	293.46	8561845.709

Tabela 114 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01a - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
505.64	36.94	231291.5656	509.28	178.24	3944147.579
505.81	38.81	323591.9162	509.52	187.2	4413773.007
505.95	42.16	406615.2676	509.73	195.07	4855141.058
506.07	43.8	480905.647	510.04	230.23	5399481.645
506.34	47.16	642833.7664	510.25	252.38	5877002.981
506.57	50.05	786890.6676	510.41	263.14	6301910
506.79	54.37	926216.0534	510.56	272.74	6720351.478
506.99	59.94	1060948.989	510.71	280.79	7120654.205
507.19	66.48	1200206.965	510.86	285.72	7530444.809
507.35	72.55	1330594.746	510.98	286.56	7896048.128
507.5	78.28	1458386.086	511.09	287.33	8253851.363
507.65	84.61	1592466.671	511.2	288.14	8607590.184
507.78	89.25	1719072.43	511.32	288.95	8944792.202
507.89	93.56	1838840.865	511.43	289.75	9276977.89
507.99	95.39	1985867.636	511.53	290.52	9612063.243
508.09	96.96	2119908.208	511.64	291.25	9957936.195
508.18	99.39	2243581.951	511.75	292.02	10295950.22
508.43	132.59	2439583.452	511.84	292.63	10610601.05
508.52	142.68	2569487.443	511.94	293.32	10923128.86
508.59	146.7	2685882.174	512.04	294.61	11249995.04
508.67	150.5	2805438.395	512.14	296.12	11564910.47
508.75	158.16	2929583.235	512.24	297.03	11863424.65
508.88	166.34	3158161.868	512.33	297.93	12180487.94
508.93	168.5	3263397.597	512.44	298.91	12496570.62
509.03	171.41	3459443.712	512.52	299.71	12784873.84

Tabela 115 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01b - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
502.99	89.08	257422.7511	504.72	259.89	4534897.445
503.09	97.15	348901.6963	504.88	260.71	5045491.912
503.18	110.93	433996.3865	505.04	261.48	5538167.647
503.25	135.81	523940.13	505.19	268.76	5999554.513
503.4	182.44	749088.5815	505.34	273.04	6456333.607
503.5	210.46	941968.4018	505.48	276.75	6899454.188
503.57	214.8	1157230.051	505.61	278.59	7328740.509
503.64	218.84	1355516.274	505.74	280.27	7738043.753
503.71	222.56	1533966.651	505.87	281.67	8150356.296
503.77	225.06	1699660.386	506	283.09	8558333.182
503.83	227.44	1873335.692	506.12	284.22	8953949.615
503.88	229.66	2034158.581	506.23	285.33	9331796.467
503.94	232.06	2184375.603	506.35	286.49	9715302.503
504	238.63	2334211.663	506.47	287.59	10078278.55
504.05	242.02	2481643.39	506.57	288.6	10434307.6
504.1	246.37	2644661.303	506.69	289.74	10808288.88
504.15	252.6	2796243.296	506.77	291.44	11128915.05
504.2	257.12	2940343.743	506.89	295.97	11490710.23
504.24	257.32	3081370.596	507	300.53	11855880.1
504.28	257.55	3196007.645	507.12	305.08	12223700.36
504.32	257.78	3326124.549	507.22	309.06	12561188.85
504.36	258	3432241.939	507.33	313.42	12918865.35
504.43	258.44	3667533.981	507.43	317.4	13279709.79
504.47	258.65	3785960.011	507.54	321.79	13643546.13
504.54	259.03	4009842.445	507.64	325.79	13997492.17



Tabela 116 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N01 - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
500.6	35.59	235504.9692	503.03	287.37	4360702.059
500.81	70.62	341593.6869	503.21	303.32	4905607.05
500.9	73.67	428736.6312	503.42	358.21	5447472.861
500.98	75.17	506252.8605	503.56	366.87	5921598.63
501.16	79.14	681049.8519	503.66	368.51	6338841.181
501.33	84.29	849421.5819	503.8	379.01	6802580.576
501.47	89.58	1008613.294	503.93	394.81	7243388.831
501.65	106.89	1176472.8	504.05	410.4	7676488.685
501.85	163.51	1382298.255	504.18	436.21	8124480.057
501.93	173.11	1540949.944	504.31	463.6	8582698.457
502.01	180.51	1686974.975	504.41	493.98	8989439.467
502.1	198.91	1840407.074	504.5	495.41	9397719.056
502.18	210.9	1977028.9	504.58	496.59	9759303.338
502.24	218.37	2111188.186	504.66	497.88	10142881.09
502.29	224.52	2238621.812	504.73	498.94	10479743.41
502.35	229.6	2366542.9	504.8	500.07	10834339.39
502.4	233.72	2492253.924	504.87	501.23	11199337.89
502.46	242.47	2613983.481	504.94	502.35	11555605.39
502.5	246.01	2731554.167	505.01	503.45	11917739.56
502.55	249.56	2846304.781	505.08	504.52	12270579.12
502.59	253.11	2958871.899	505.15	505.56	12610314.64
502.64	256.83	3070077.305	505.22	506.6	12951461.7
502.73	263.12	3291486.416	505.28	507.6	13293404.99
502.76	264.52	3386109.629	505.35	508.7	13637840.61
502.84	268.42	3600253.145	505.42	509.74	13970945.95

Tabela 117 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02a - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
494.92	33.33	188375.9622	497.37	192.7	3598194.345
495.1	35.59	254464.1646	497.58	194.51	4004840.489
495.38	84.16	338848.5342	497.77	195.87	4386065.288
495.47	102.58	417453.0455	497.95	196.99	4753317.73
495.63	124.42	584106.971	498.12	198.11	5105598.628
495.75	129.68	753857.8665	498.29	199.18	5457997.895
495.86	136.43	935612.4636	498.45	200.17	5792185.209
495.96	145.22	1087715.065	498.61	200.96	6115502.735
496.05	149.12	1223709.355	498.76	201.74	6433200.375
496.13	152.34	1361866.677	498.92	202.51	6743973.891
496.22	161.3	1490781.506	499.06	203.05	7049563.15
496.29	163.15	1627869.086	499.21	203.52	7349005.877
496.36	164.85	1748691.776	499.35	203.97	7642487.148
496.42	166.69	1858534.927	499.5	204.44	7921904.729
496.49	168.52	1966515.193	499.63	204.88	8203835.367
496.55	170.28	2064988.611	499.76	205.29	8490744.625
496.61	171.94	2172015.454	499.89	205.72	8766772.687
496.67	173.54	2269462.891	500.03	206.5	9055306.925
496.73	175.12	2377770.851	500.16	207.95	9326660.139
496.78	176.66	2473209.411	500.29	213.14	9593443.654
496.84	178.16	2579457.982	500.42	218.29	9861606.581
496.89	179.65	2685493.794	500.55	223.38	10134200.29
496.99	182.57	2892136.437	500.67	228	10392870.19
497.04	183.96	2986501.361	500.79	232.95	10652719.97
497.14	186.64	3169056.216	500.93	238.27	10926029.33

Tabela 118 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02b - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
493.32	62.25	305109.6777	495.72	235.41	5136110.779
493.44	67.49	409910.9715	495.9	237.05	5704015.099
493.53	70.75	510231.8412	496.07	238.25	6244101.252
493.62	76.02	603695.4795	496.23	239.39	6763789.518
493.82	90.66	817576.6061	496.39	240.35	7271472.081
493.98	103.5	1014720.697	496.54	241.32	7758331.061
494.14	126.78	1225427.637	496.68	242.41	8238518.65
494.27	146.72	1431184.782	496.82	243.62	8701071.996
494.37	160.67	1607946.496	496.96	244.97	9171011.664
494.45	163.37	1775877.496	497.09	246.29	9612623.059
494.52	165.63	1964416.912	497.22	247.49	10044635.06
494.59	167.16	2229497.355	497.35	248.83	10475784.26
494.65	168.04	2434392.051	497.48	250.07	10896103.5
494.72	168.88	2610214.13	497.6	251.27	11309073.95
494.78	169.72	2771163.201	497.71	252.37	11718339.15
494.84	170.45	2919816.888	497.83	253.53	12116823.25
494.89	171.15	3062996.769	497.96	254.76	12524613.05
494.95	171.77	3196283.476	498.06	255.78	12890112.05
495.01	172.45	3339263.077	498.18	256.98	13309812.54
495.06	173.11	3463382.417	498.28	257.97	13651781
495.12	174.91	3601801.552	498.4	259.14	14062146.28
495.18	179.77	3749064.505	498.5	260.09	14396213.33
495.3	193.14	4030487.486	498.62	261.23	14790936.66
495.36	196.35	4171086.268	498.72	262.25	15153024.29
495.48	210.48	4464298.539	498.81	263.16	15486038.06

Tabela 119 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N02 - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
490.64	93.54	290204.3915	492.37	249.04	4708295.107
490.72	101.02	395460.4357	492.54	250.64	5234866.97
490.8	106.79	489185.7116	492.69	251.69	5729976.647
490.87	116.47	587372.3088	492.85	252.79	6221005.691
491.04	175.2	813856.8516	493	255.37	6687848.799
491.15	220.19	1019070.112	493.15	256.5	7137937.598
491.23	227.67	1201144.973	493.28	257.55	7576271.89
491.29	228.5	1380083.681	493.42	258.24	8003026.902
491.36	229.47	1546974.634	493.55	258.93	8409441.005
491.41	230.45	1700412.724	493.67	259.59	8811812.137
491.47	231.58	1859659.436	493.8	260.25	9209235.907
491.53	233.46	2067479.221	493.92	261.05	9604751.877
491.58	235.44	2235683.307	494.04	263.59	10006658.31
491.63	236.82	2406326.229	494.16	264.46	10395279.3
491.68	238.21	2560818.349	494.28	265.31	10771719.52
491.73	239.44	2718398.672	494.39	266.15	11167518.74
491.77	240.42	2861337.422	494.5	266.97	11545715.01
491.82	241.36	2996550.553	494.61	267.78	11919986.68
491.86	242.29	3129773.828	494.72	268.58	12289907.52
491.91	243.2	3270180.804	494.82	269.37	12649196.27
491.95	244.12	3399222.235	494.92	270.14	13018298.69
491.99	244.59	3530774.407	495.03	270.9	13370345.13
492.07	245.45	3793730.498	495.13	271.66	13740384.46
492.11	245.87	3920187.097	495.23	272.4	14076853.33
492.18	246.69	4153750.453	495.33	273.11	14418258.25

Tabela 120 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03a - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
487.65	92.22	290669.3023	490	243.18	4433549.73
487.74	104.03	394422.0793	490.19	258.56	4975703.936
487.81	109.66	493947.1331	490.35	260.22	5453708.086
487.88	116.43	589340.1806	490.5	261.8	5905257.385
488.02	122.3	801959.8843	490.65	263.32	6344862.116
488.13	126.02	989659.0617	490.79	264.75	6774398.371
488.24	128.58	1175117.368	490.93	266.14	7187351.625
488.33	130	1336299.554	491.06	267.49	7590207.034
488.43	131.49	1488857.158	491.19	268.9	7985018.068
488.51	132.85	1642207.353	491.32	270.55	8370224.076
488.59	134.37	1781234.041	491.44	271.76	8742656.482
488.67	136.24	1920466.667	491.56	272.93	9127660.939
488.75	138.42	2058138.643	491.68	274.08	9491237.932
488.83	140.75	2197629.407	491.79	275.25	9855442.141
488.92	151.51	2345266.711	491.91	276.35	10220856.73
489	154.38	2476931.215	492.02	277.44	10576214.92
489.06	156.22	2598531.542	492.12	278.42	10908355.61
489.13	157.75	2717053.457	492.23	279.55	11266095.43
489.19	159.15	2835577.521	492.33	280.85	11597985.77
489.25	160.32	2947374.674	492.44	282.34	11949189.67
489.3	161.45	3060040.884	492.55	283.71	12290162.13
489.36	162.58	3171671.406	492.64	284.97	12599688.79
489.47	164.7	3388948.706	492.75	286.38	12935130.84
489.51	165.5	3484981.234	492.84	287.61	13246565.83
489.78	229.21	3891158.875	492.95	289.05	13601622.82

Tabela 121 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03b - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
485.36	97.92	318996.7536	487.21	220.6	5378206.117
485.46	134.13	458615.9676	487.39	221.58	5985583.757
485.53	157.42	579983.8677	487.57	222.53	6569635.855
485.58	164.55	695855.7123	487.73	223.45	7132756.673
485.69	174.96	927407.3916	487.9	224.34	7675309.673
485.78	176.82	1146193.086	488.05	225.2	8177629.356
485.86	178.5	1359175.302	488.2	226.03	8661877.251
485.94	179.94	1553659.031	488.35	226.83	9154190.156
486.01	181.52	1725766.155	488.49	227.61	9629197.038
486.08	182.99	1937418.67	488.63	228.36	10101867.71
486.15	184.29	2142436.221	488.77	229.14	10570862.41
486.21	185.53	2320287.027	488.9	230.15	11014427.38
486.27	186.76	2504289.354	489.03	231.12	11464211.64
486.33	187.69	2696777.125	489.16	232.08	11899807.44
486.39	188.42	2880827.541	489.29	233.03	12314283.46
486.45	190.6	3064829.242	489.41	233.92	12745811.02
486.5	192.78	3227823.142	489.53	234.83	13160284.38
486.56	194.95	3390016.258	489.65	235.72	13567990.85
486.61	196.89	3547734.45	489.77	236.6	13969266.15
486.66	198.82	3716056.704	489.88	237.46	14363680.79
486.71	200.72	3872962.73	490	238.32	14769966.6
486.76	202.54	4024763.606	490.11	239.15	15152558.85
486.85	206.02	4317884.99	490.22	239.98	15524223.86
486.9	208.03	4463231.546	490.33	240.8	15899321.32
486.99	212.53	4728023.315	490.44	241.61	16269999.28

Tabela 122 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N03 - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
483.75	162.35	308975.7336	485.11	310.95	5157188.052
483.82	183.1	415159.1828	485.25	311.58	5758489.97
483.87	209.57	510005.8028	485.39	312.17	6290944.4
483.91	229.44	601609.8608	485.52	312.74	6812849.123
484.01	256.83	820345.0288	485.65	313.29	7313422.577
484.08	272.69	1037721.194	485.77	313.83	7781452.989
484.15	282.73	1232077.298	485.88	314.32	8260524.172
484.21	288.9	1466944.458	486	314.82	8716676.824
484.26	294.86	1661938.561	486.11	315.32	9146529.318
484.31	301.74	1896737.446	486.23	315.81	9575991.648
484.36	307.37	2086279.498	486.34	318.55	9994159.594
484.4	307.58	2250688.95	486.45	319.38	10421935.11
484.45	307.84	2441129.83	486.55	320.2	10848307.95
484.49	308.06	2606356.155	486.66	320.99	11268737.91
484.53	308.27	2783114.944	486.76	321.77	11696541.44
484.57	308.48	2944801.214	486.86	322.54	12068624.63
484.61	308.69	3100857.965	486.95	323.27	12470738.65
484.65	308.89	3249985.042	487.04	324.01	12860343.58
484.68	309.08	3389527.539	487.14	324.73	13243002.97
484.72	309.27	3547897.284	487.23	325.45	13592235.36
484.75	309.42	3695831.872	487.32	326.16	13993816.32
484.79	309.57	3837532.105	487.41	326.85	14361601.67
484.86	309.86	4098345.238	487.5	327.54	14725277.36
484.89	310.01	4231547.691	487.59	328.22	15084707.49
484.95	310.29	4505154.712	487.67	328.89	15440732.8

Tabela 123 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N Pa - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
482	79.67	210381.694	484	375.58	4086691.134
482.1	92.7	289386.8379	484.14	377.15	4537949.888
482.19	106.83	367496.5264	484.25	378.19	4952346.199
482.25	112.17	432923.7304	484.37	379.22	5358835.588
482.4	123.98	587120.4605	484.48	380.22	5757928.091
482.52	129.96	734842.7317	484.59	381.19	6133906.746
482.64	146.47	880624.0083	484.69	382.12	6500386.963
482.75	163.96	1023360.081	484.8	383.05	6866834.84
482.83	166.24	1143328.787	484.9	383.92	7221178.06
482.9	169.1	1259104.373	485	384.77	7571866.034
482.98	174.77	1380562.343	485.09	385.57	7910446.855
483.05	180.17	1494856.908	485.19	386.44	8265234.177
483.12	185.52	1615011.272	485.28	387.76	8586475.811
483.2	198.41	1766179.785	485.36	390.46	8889103.743
483.29	216.61	2009118.497	485.46	393.62	9225438.549
483.36	240.48	2187172.467	485.55	396.45	9537920.004
483.43	254.61	2339620.11	485.62	398.86	9818541.434
483.5	284.88	2506412.052	485.7	401.63	10126577.81
483.55	294.91	2640324.522	485.79	404.37	10432090.88
483.61	316.26	2799623.06	485.87	407.05	10733546.05
483.65	329.9	2938816.137	485.95	409.9	11047505.4
483.69	339.36	3060836.454	486.04	412.8	11373124.56
483.77	354.8	3286923.482	486.12	415.41	11670792.01
483.8	360.99	3398983.019	486.19	417.6	11932962.79
483.87	370.26	3607838.367	486.26	446.64	12222052.47



Tabela 124 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção N Pb - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
481.2	138.28	178646.5546	482.88	306.78	2699520.468
481.27	157.86	247291.6231	483.13	412.21	3146275.287
481.33	166.63	309727.5176	483.28	445.14	3505003.319
481.38	173.73	367252.5109	483.39	461.1	3811097.26
481.49	190.62	494728.7105	483.49	462.34	4098035.946
481.58	197.7	607012.231	483.59	463.63	4372723.785
481.65	199.14	710764.705	483.68	467.07	4642345.243
481.73	200.2	806694.5263	483.77	471.59	4903698.71
481.79	201.14	901014.0385	483.86	476.03	5164329.181
481.86	202.01	992505.1143	483.95	480.32	5416891.328
481.92	206.74	1085575.626	484.03	486.89	5666987.577
481.99	212.81	1178746.449	484.11	497.45	5915374.63
482.07	240.92	1289866.567	484.19	507.84	6160795.295
482.13	246.37	1376585.953	484.27	518.05	6405319.521
482.18	249.96	1461401.836	484.35	528.08	6649206.086
482.22	253.48	1543546.453	484.43	537.97	6889237.212
482.27	257.01	1625180.037	484.5	547.76	7134484.921
482.32	260.11	1710783.762	484.58	557.33	7372956.981
482.36	263.02	1786868.416	484.65	566.79	7614591.137
482.41	265.53	1859935.72	484.72	576.14	7861717.334
482.44	267.77	1929045.223	484.79	585.42	8108217.915
482.49	270.74	2007677.47	484.86	594.54	8361743.441
482.56	275.36	2142813.056	484.93	603.48	8616060.286
482.6	278.28	2212419.158	485	612.12	8865820.624
482.68	284.09	2350870.177	485.07	621.23	9135778.364

Tabela 125 – Valores de Cota, Largura da Seção e Armazenamento para a Seção Piraporaponte - Onda Difusiva Refinada (DW10km)

Cota(m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Cota (m)	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
544.67	59.76	335913.0581	548.15	93.06	5426567.85
544.79	61.74	456511.0936	548.54	96.63	6056756.05
544.9	66.76	569695.6594	548.91	100.13	6643692.81
544.99	67.14	679979.1339	549.25	103.56	7256671.779
545.21	67.5	933153.2761	549.58	107.26	7836828.698
545.4	67.83	1162822.147	549.91	110.81	8415406.16
545.56	68.14	1485035.696	550.2	114.11	8995414.518
545.7	68.44	1748678.125	550.51	124.13	9592512.134
545.84	68.72	1976141.699	550.8	165.03	10290276.53
545.97	69	2170507.9	551.07	180.78	11043076.54
546.1	69.28	2354585.076	551.36	207.75	11677788.72
546.21	69.54	2532500.971	551.73	242.41	12343105.61
546.33	69.79	2709415.308	552.06	428.96	13002754.84
546.45	70.13	2877326.411	552.25	434.2	13661821.1
546.56	70.64	3043021.111	552.35	439.41	14237795.34
546.66	71.18	3200342.679	553.64	445.51	15145160.31
546.77	71.68	3357343.246	553.79	449.67	15757700.15
546.87	72.14	3508610.956	553.94	454.28	16354201.84
546.98	72.68	3658630.017	554.11	459.53	16937137.79
547.08	75.54	3799975.905	554.23	464.31	17533424.63
547.17	75.87	3943415.284	554.36	468.54	18134336.24
547.28	76.52	4087582.337	554.51	472.58	18688817.2
547.48	80.82	4366390.456	554.64	507.65	19283493.56
547.57	85.56	4504766.163	554.76	508.66	19813158.57
547.74	89.43	4779093.965	554.87	509.68	20401123

# APÊNDICE G – RTC-Tools - Geometria para Casacada de Reservatórios do RTC-Tools

Tabela 126 – Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio Abaetés (PBR040) - Cascata de Reservatórios (RR)

Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
40	500.6	709582.6202	1500	503.04	10316892.64
60	500.81	951476.8237	1750	503.2	11520296.87
80	500.9	1174139.107	2000	503.42	12664492.06
100	500.98	1394167.103	2250	503.55	13808326.88
150	501.16	1895904.656	2500	503.67	14934261.93
200	501.33	2331869.56	2750	503.79	16034690.68
250	501.48	2855979.509	3000	503.93	17126224.72
300	501.65	3320833.053	3250	504.05	18215227.76
350	501.85	3738518.624	3500	504.18	19430320.64
400	501.93	4126182.31	3750	504.31	20662095.66
450	502.02	4479614.888	4000	504.43	21811729.66
500	502.11	4820132.305	4250	504.5	22971474.25
550	502.18	5150519.583	4500	504.58	24116523.06
600	502.23	5468891.173	4750	504.65	25236156.66
650	502.3	5778120.67	5000	504.73	26292436.63
700	502.35	6090564.694	5250	504.8	27677477.71
750	502.41	6380730.874	5500	504.87	28749155.13
800	502.45	6669327.57	5750	504.94	29761728.71
850	502.5	6958243.853	6000	505.01	30771683.36
900	502.55	7233915.944	6250	505.08	31781982.3
950	502.6	7508181.829	6500	505.15	32856716.88
1000	502.64	7779798.867	6750	505.22	34004638.32
1100	502.72	8298596.457	7000	505.28	35120593.6
1150	502.77	8560059.79	7250	505.35	36037701.77
1250	502.83	9083206.19	7500	505.41	39018996.5

Tabela 127 – Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio São Francisco (N01a) - Cascata de Reservatórios (RR)

Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
40	500.6	644295.0997	1500	503.03	11302863.87
60	500.81	883397.4	1750	503.21	12608541.96
80	500.9	1109954.629	2000	503.43	13840160.36
100	500.98	1328344.783	2250	503.56	15133813.71
150	501.16	1863368.134	2500	503.68	16342883.39
200	501.33	2311291.121	2750	503.79	17473643.67
250	501.47	2783061.739	3000	503.93	18583433.01
300	501.65	3217562.781	3250	504.05	19644663.9
350	501.85	3638507.794	3500	504.18	20720430.06
400	501.93	4029129.765	3750	504.31	21739027.24
450	502.01	4423549.746	4000	504.42	22747004.24
500	502.1	4816635.439	4250	504.5	23704028.6
550	502.18	5185895.365	4500	504.58	24663977.13
600	502.24	5544345.026	4750	504.66	25590776.56
650	502.3	5923208.996	5000	504.73	26509738.8
700	502.35	6301302.385	5250	504.8	27452023.89
750	502.4	6658478.865	5500	504.87	28319284.84
800	502.45	7077346.163	5750	504.94	29223550.31
850	502.51	7441284.817	6000	505.01	30113332.2
900	502.55	7776427.992	6250	505.08	31018101.46
950	502.6	8112278.655	6500	505.15	31878019.2
1000	502.64	8424783.143	6750	505.22	32728423.5
1100	502.72	9030523.671	7000	505.29	33622019.79
1150	502.77	9331924.474	7250	505.35	34501948.98
1250	502.85	9887466.994	7500	505.42	35344211.72

Tabela 128 – Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio São Francisco (N02) - Cascata de Reservatórios (RR)

Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
40	490.86	728990.6091	1500	493.16	13095007.18
60	490.96	1005968.823	1750	493.34	14614462.64
80	491.05	1277817.007	2000	493.51	16077639.4
100	491.13	1527401.386	2250	493.67	17438705.88
150	491.28	2082733.429	2500	493.83	18715911.89
200	491.41	2618000.146	2750	493.98	20018909.53
250	491.54	3169653.395	3000	494.13	21274092.69
300	491.66	3695372.647	3250	494.28	22493063.42
350	491.77	4213954.106	3500	494.42	23728692.1
400	491.88	4678694.116	3750	494.56	24939295.41
450	492.01	5142173.393	4000	494.7	26083637.68
500	492.2	5697773.515	4250	494.82	27222509.19
550	492.31	6160112.727	4500	494.95	28297893.99
600	492.38	6579937.243	4750	495.07	29373859.77
650	492.44	6976300.206	5000	495.2	30401917.93
700	492.5	7351348.399	5250	495.32	31441907.27
750	492.54	7727266.147	5500	495.44	32490723.62
800	492.59	8079729.849	5750	495.55	33501024.37
850	492.64	8448588.095	6000	495.67	34554212.23
900	492.67	8782896.608	6250	495.77	35515803.77
950	492.72	9140131.434	6500	495.89	36534067.5
1000	492.77	9504635.603	6750	495.99	37481875.32
1100	492.85	10214110.34	7000	496.1	38477211.84
1150	492.89	10543697.26	7250	496.21	39443584.87
1250	492.97	11233607.9	7500	496.31	40383013.35

Tabela 129 – Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para o Rio São Francisco (N03) - Cascata de Reservatórios (RR)

Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
40	485.93	745662.3696	1500	488.25	11947002.44
60	486.08	1036513.596	1750	488.42	13341188.11
80	486.18	1300525.898	2000	488.59	14629480.16
100	486.24	1548922.462	2250	488.74	15876959.33
150	486.38	2111742.004	2500	488.89	17076959.88
200	486.51	2612462.223	2750	489.01	18217758.15
250	486.62	3082614.341	3000	489.13	19331337.77
300	486.72	3516211.991	3250	489.25	20411704.86
350	486.82	3927931.869	3500	489.37	21465502.99
400	486.91	4322965.229	3750	489.49	22507892.62
450	487.02	4716917.326	4000	489.61	23531343.92
500	487.1	5147438.098	4250	489.72	24540302.9
550	487.19	5545119.451	4500	489.83	25547273.58
600	487.29	5949260.817	4750	489.94	26531563.51
650	487.38	6350073.031	5000	490.03	27488134.09
700	487.47	6743347.168	5250	490.15	28473175.94
750	487.54	7093434.636	5500	490.25	29403143.19
800	487.6	7434922.229	5750	490.34	30351432.79
850	487.66	7771039.896	6000	490.44	31266505.61
900	487.73	8117262.298	6250	490.53	32181145.54
950	487.78	8442937.866	6500	490.64	33114819.51
1000	487.84	8767168.75	6750	490.73	33979303.09
1100	487.94	9413155.028	7000	490.81	34879362.87
1150	487.99	9717272.315	7250	490.9	35726643.48
1250	488.06	10497509.82	7500	490.99	36620111.45

Tabela 130 – Valores de Vazão, Largura da Seção e Armazenamento para até Pirapora - Cascata de Reservatórios (RR)

Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )	Vazão ( $m^3/s$ )	Largura (m)	Armazenamento ( $m^3$ )
40	481.79	852212.06	1500	483.02	14516448.17
60	481.86	1163822.53	1750	483.14	16297681.7
80	481.91	1449820.661	2000	483.25	17872134.35
100	481.95	1725431.842	2250	483.35	19364842.39
150	482.02	2333676.324	2500	483.45	20800447.32
200	482.09	2922036.193	2750	483.55	22160290.7
250	482.15	3476289.313	3000	483.64	23497419.38
300	482.21	4050829.341	3250	483.73	24822929.61
350	482.26	4539947.465	3500	483.82	26090189.68
400	482.32	5105420.451	3750	483.91	27340760.31
450	482.37	5618829.839	4000	483.99	28563004.91
500	482.42	6085087.124	4250	484.07	29809081.22
550	482.46	6598999.522	4500	484.15	31010413.36
600	482.5	7100593.837	4750	484.23	32182126.55
650	482.54	7690474.847	5000	484.3	33389911.69
700	482.58	8192332.095	5250	484.37	34512150.59
750	482.61	8659915.582	5500	484.45	35634976.81
800	482.65	9135878.896	5750	484.52	36762518.54
850	482.68	9558766.38	6000	484.59	37880338.81
900	482.71	10023805.95	6250	484.66	38968419.94
950	482.74	10452981.21	6500	484.73	40113147.54
1000	482.77	10866086.7	6750	484.8	41239759.35
1100	482.82	11615490.94	7000	484.88	42332505.94
1150	482.85	11994077.43	7250	484.94	43379587.91
1250	482.9	12739286.08	7500	485.02	44468332.54





## APÊNDICE H – Sumário dos Resultados

A tabela abaixo sumariza os resultados obtidos na comparação dos modelos selecionados: SOBEK que tem como equação governante a versão totalmente dinâmica das ESV; MGB-IPH que utiliza Muskingum-Cunge Não-Linear; e as três configurações do RTC-Tools, Cascada de Reservatórios (R.R.) e Onda Difusiva (D.W.) com diferentes resoluções espaciais. Na tabela estão apresentadas os indicadores de desempenho (Bias, RMSE,  $R^2$  e NSE) e os tempos de processamento.

Tabela 131 – Desempenho estatístico e computacional dos modelos no Ponto Pirapora para os modelos hidrodinâmicos utilizados: SOBEK, MGB, R.R. e D.W.

	Desempenho Computacional [ms]	Bias [m <sup>3</sup> /s]	RMSE [m <sup>3</sup> /s]	R <sup>2</sup> [-]	NSE [-]
SOBEK	51090	13.87	78.62	0.974	0.988
MGB	345	13.33	120.94	0.960	0.958
$\Delta t = 60\text{min}$	249	0.034	68.72	0.980	0.980
$\Delta t = 40\text{min}$	374	0.050	68.61	0.980	0.980
R.R. $\Delta t = 30\text{min}$	499	0.050	68.76	0.980	0.980
$\Delta t = 20\text{min}$	749	0.055	69.00	0.980	0.979
$\Delta t = 10\text{min}$	1560	0.060	69.29	0.979	0.979
$\Delta t = 60\text{min}$	8814	0.096	70.93	0.978	0.978
$\Delta t = 40\text{min}$	12496	0.113	70.79	0.979	0.978
D.W. 10km $\Delta t = 30\text{min}$	15709	0.113	70.59	0.979	0.978
$\Delta t = 20\text{min}$	22090	0.119	70.51	0.979	0.978
$\Delta t = 10\text{min}$	40419	0.125	70.44	0.979	0.979
$\Delta t = 60\text{min}$	2449	0.214	76.62	0.975	0.975
$\Delta t = 40\text{min}$	3525	0.231	76.32	0.975	0.975
D.W. 30km $\Delta t = 30\text{min}$	4571	0.231	76.18	0.975	0.975
$\Delta t = 20\text{min}$	6661	0.237	76.04	0.975	0.975
$\Delta t = 10\text{min}$	12574	0.241	75.91	0.975	0.975