

Oportunidades no desenvolvimento de ferramentas para modelação de otimização de operação de reservatórios para curto prazo

Julio Issao Kuwajima^{1}; Dirk Schwanenberg²; Frederico Fábio Mauad³; André Niemann⁴*

Resumo – Dentre os usos múltiplos dos recursos hídricos, destaca-se no Brasil a modalidade da geração hidrelétrica, sendo esta responsável por 67% da atual capacidade instalada. Atualmente no país observa-se uma tendência de redução de oferta de energia devido à situação econômica do país e esgotamento de oportunidades para construção de grandes empreendimentos hidroelétricos. Este cenário introduz a oportunidade de um melhor gerenciamento destes recursos visando otimizar a geração de energia. O presente trabalho tem como objetivo apontar as potencialidades do RTC-Tools, que é um modelo de otimização de reservatórios do DELFT-FEWS, através dele é possível desenvolver soluções adaptadas para problemas através da integração de modelos hidrológicos, banco de dados e modelos de previsão meteorológica. Isto significa que através dos modelos de previsão de chuva de curto-prazo (20 dias) é possível prever a vazão de entrada nos reservatórios para encontrar as melhores oportunidades para reservação ou turbinação.

Palavras-Chave – Hidroelétricas, Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos, Otimização.

Opportunities on the development of short-term reservoir optimization modeling tools.

Abstract – In Brazil the hydropower electric energy production has a prominent role within the water resources multiple uses. Currently the hydropower is responsible for circa 67% of the country's electric installed capacity. Nowadays there is a energy supply downward trend due to the country's economic situation and exhaustion of opportunity for large hydropower developments construction. This scenario introduces the opportunity for a better management of the hydric resources in order to optimize power generation. This paper aim to point out the RTC-Tools potentialities, which is a reservoir optimization model from DELFT-FEWS. Through it is possible to develop tailored solutions to regional problems by integrating hydrologic models, databases and weather forecasting models. This means that it's possible to use short-term rain forecasting models (20 days) to predict the reservoir's input flows to find the best opportunities for the output flows (reservation or turbination).

Keywords – Hydropower dams, Water Resources Integrated Management, Optimization.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil os recursos hídricos assumem papel de importância estratégica, principalmente na questão energética, visto que a geração da mesma é predominantemente hidrelétrica, sendo em 2011 responsável por 67% ou 77001MW de um total de 115162 MW da capacidade instalada para geração energia elétrica do país. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2011, (2012) a expansão hidrelétrica planejada prevista até 2021 será de um acréscimo de 19 empreendimentos totalizando 19673 MW instalados para grandes centrais hidrelétricas, o que representará um aumento de 25,54 %. Observa-se-a uma forte expansão na geração de energia até 2014 e após esta data o parque gerador permanecerá praticamente estável. Um sinal da desaceleração da construção de hidrelétricas pode ser notado em 2011 onde dos 4735,10 MW ampliados mais da metade (51%) correspondiam à produção de usinas termoelétricas, sendo que as hidrelétricas correspondiam a

¹ Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental (EESC – USP), e-mail: julio.kuwajima@usp.br

² Pesquisador Sênior do Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management – Universität Duisburg-Essen, Alemanha & Department of Operational Water Management Deltares, Países Baixos

³ Professor Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental (EESC – USP)

⁴ Professor do Institute of Hydraulic Engineering and Water Resource Management – Universität Duisburg-Essen, Alemanha

1349,09 MW (28,45%) e as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) 441,99 MW (9,33%) (Relatório ANEEL 2011, 2012).

O cenário atual brasileiro é de diminuição da oferta de energia tanto deflagrado pelo recente progresso econômico e aumento do poder de consumo da população quanto pela resistência e restrições da construção de novos grandes empreendimentos imobiliários e à idade avançada de algumas represas que passaram a enfrentar problemas como assoreamento. Portanto justifica-se adotar gerenciamento dos recursos hídricos mais eficiente visando otimização dos reservatórios para a geração elétrica e a busca de melhores oportunidades de negociação de preço da energia será um desafio futuro do parque hidroelétrico no país. Para abordar estes desafios é necessário um tratamento integrado para geração de energia e comercialização que permita o gerenciamento integrado do sistema explorando as variáveis dependentes do clima, dos corpos de água, carga e comércio. Neste esquema (Figura 1), a comercialização está incluída para considerar oportunidades de comercialização de energia. Um motivador para isto é a percepção de oportunidades de negócio explorando a flexibilidade dos atuais estados do sistema.

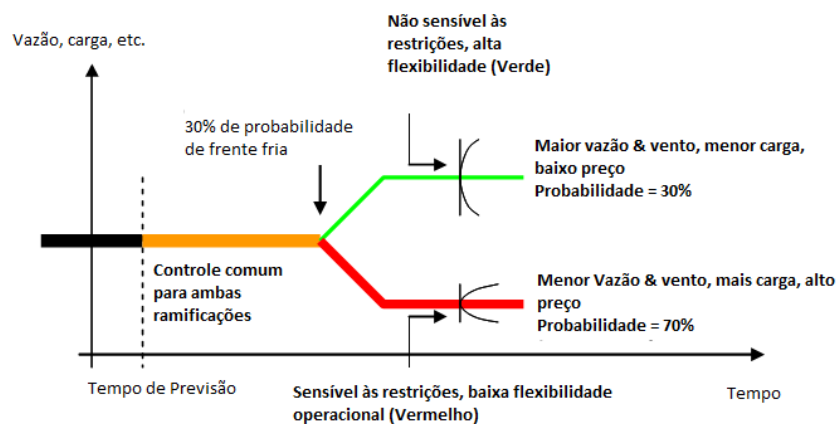


Figura 1 – Gerenciamento Integrado de sistemas de produção hidroelétrica e comercialização no verão (a grossura da linha representa a probabilidade e a cor à flexibilidade operacional).

Recentes avanços têm sido feito neste sentido com o desenvolvimento do Delft-FEWS e RTC-TOOLS (*Real-Time Control Tools*), que são modelos capazes de explorar flexibilidades operacionais e restrições do sistema associados a análises estocásticas de previsão climática e hidrológica de curto prazo e modelos de processos para obter esquemas e regras de operação que permitam otimizar o recurso hídrico. A aplicação destes modelos permite planejar a reservação ou turbinação de água conforme a disponibilidade futura da mesma e redução de custos operacionais (Schwanenberg, Galelli *et al.*, 2011), (Schwanenberg, Van Breukelen *et al.*, 2011), (Schwanenberg, Ochterbeck *et al.*, 2012) e (Schwanenberg, Sheret *et al.*, 2012).

2. MODELAÇÃO HIDROLÓGICA APLICADA À GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A gestão de recursos hídricos compreende estudos de planejamento e resoluções das questões relativas aos recursos hídricos e eventos de estresse como escassez de água ou de qualidade de água de uma determinada região. Para facilitar o entendimento destes processos, utilizam-se a modelagem, simulação computacional e análise de cenários para tomada de decisão. A utilização de cenários permite avaliar os efeitos de impactos ambientais deflagrados por determinados estados ou condições na bacia, rio ou reservatório, assim permitindo planejar ações para minimizar estes

impactos na disponibilidade e a qualidade da água, e dessa forma promover a gestão otimizada dos recursos hídricos.

Podem-se definir os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) como sistemas de informações com ferramentas avançadas para auxiliar no processo de tomada de decisões. Estas ferramentas são essenciais para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, pois 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, Brazil *et al.*, 1989) consideram que os Sistemas de Suporte a Decisão constituem metodologia apropriada para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.

Para (Denzer, 2005) os SSDs podem ter uma estrutura personalizada para cada aplicação podendo ser genérico o que significa que não é necessário reprogramar o SSD para que o mesmo seja utilizado por outros usuários, esta abordagem é mais efetiva em longo prazo apesar de ser muito mais complexa, pois em curto prazo dificilmente seria possível construir um SSD integrado com várias metodologias de maneira genérica. No entanto, existem pesquisas em andamento que prometem soluções mais generalizadas como é o caso da iniciativa OpenMI (Blind e Gregersen, 2005).

3. INTEGRAÇÃO DE MODELOS PARA GERENCIAMENTO INTEGRADO DE BACIAS

Conforme explicado na seção 2, 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. Gerenciar processos ambientais individualmente nem sempre resulta em decisões sensatas e devido à dificuldade e possivelmente inconveniência de conceber um modelo holístico, é importante ser capaz de modelar processos individuais e de conseguir com que eles interajam entre si. Consequentemente, muitos dos modelos hidrológicos de SSD existentes se utilizam de modelos hidrológicos combinados como bloco base de construção (Gregersen, Gijssbers *et al.*, 2007). Dentre os modelos hidrológicos mais utilizados e conhecidos figuram os modelos do tipo aglomerado: “*Sacramento Soil Moisture Accounting Model*” ou SAC-SMA (Burnash, Ferral *et al.*, 1973; Burnash, 1995) e o modelo HBV (Bergström e Forsman, 1973; Bergström, 1995).

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. A integração de aplicativos é uma tarefa complexa principalmente se o objetivo é proporcionar uma interface amigável, neste contexto surgem o OpenM (*Open Modelling Interface*) e o Delft-FEWS, que são interfaces que permitem articular e vincular estes diferentes modelos.

3.1. OpenMI

Essencialmente o OpenMI é um software de definição de interface de componentes para núcleo computacional dos modelos hidrológicos e hidráulicos. Componentes de modelo que obedecem este padrão podem sem nenhuma programação serem configurados para trocar dados durante a operação (durante a execução). Isto significa que sistemas combinados podem ser criados e podem ser baseados nos modelos compatíveis com o OpenMI de diferentes fornecedores, assim possibilitando que o usuário escolha e utilize os modelos mais adequados para o projeto em particular (Gregersen, Gijssbers *et al.*, 2007).

3.2. Delft-FEWS

O software Delft-FEWS da Deltares representa o maior 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, Schillekens *et al.*, 2012).

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 sistemas complexos e é possível adapta-lo 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 (DELFT-FEWS Documentation, 2012).

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 (*Real-Time Control Tools*) e o SOBEK.

3.2.1. RTC TOOLS

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. (Schwanenberg, 2009).

Com o intuito de realizar simulações de diversas técnicas de controle em tempo real, e não tendo como objetivo realizar simulações detalhadas de grandes sistemas de recursos hídricos para dimensionamento e projeto. Este modelo foca na operação. Isto incluiu por definição todos os estados de sistema gatilhos, controladores, regras de operação e componentes de modelação. O RTC-Tools é um pacote de blocos de elementos para aplicações de controle em tempo real.

3.2.2. SOBEK

O SOBEK é um pacote de software desenvolvido por Deltares, e compatível com o DELFT-FEWS, que 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 unidimensional (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*).

4. FONTES DE INCERTEZAS

Podemos definir incerteza como uma fonte de erro no sistema, no caso de modelos matemáticos estas incertezas seriam dados de entrada do modelo, os quais apresentem erros de medição ou de estimativa, que tragam componentes aleatórios e/ou sistemáticos para os dados de saída, assim tendenciado os resultados.

Apesar de recentemente o CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) ter adquirido um novo supercomputador, que melhorou a resolução espacial de 30 para 15 km e com uma capacidade de processamento 50 vezes maior ao antigo (http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2163, 2010); o horizonte de simulação e precisão de 20 dias pode acumular diversos erros gerando dados com viés.

Outra fonte de incertezas existente para as hidrelétricas brasileiras são as curvas cota-área e cota-volume desatualizadas, muitas represas não realizam periodicamente campanhas topobatimétricas para atualiza-las, considerando o volume útil do reservatório como sendo o volume do levantamento topográfico prévio ao enchimento da barragem. A deposição de sedimentos no fundo da barragem pode ter como consequências alteração no volume útil do reservatório e na capacidade de reservação, podendo até interferir na operação da mesma (Carvalho, 1994). Esta é uma variável de significante importância a ser avaliada visto que existe escassez de trabalhos, que avaliam os efeitos da perda de reservação da barragem no planejamento e gerenciamento de reservatórios.

4.1. Ensembles

Usinas de geração de energia convencionais como termelétricas ou nucleares podem ser controladas e programadas com facilidade, visto que é possível aumentar ou diminuir a geração de energia controlando o combustível das mesmas. Porém devido à variação temporal e espacial climática as incertezas na capacidade de geração estão associadas às usinas de energia renováveis como hidroelétricas e geradores eólicos, sendo a otimização da operação destas tecnologias bastante condicionadas a capacidade da predição dos eventos climáticos.

Sistemas hidrodinâmicos podem apresentar comportamento de fluxo com padrões em estado estacionário, ou podem oscilar em períodos regulares, no entanto existem alguns que apresentam uma variação irregular, que mesmo observando longos períodos não apresentam quaisquer padrões de repetição (não periódicos). É possível obter soluções particulares de maneira analítica, principalmente quando as soluções são periódicas, 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 da trajetória no espaço físico. Para tais 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).

Deste modo calculam-se os conjuntos de agrupamento, os “ensembles” são um recurso da estatística mecânica, que são agrupamentos de vários sistemas que apesar das condições iniciais diferentes, são idênticos em um sistema estatisticamente considerado, tanto para vazão do rio que representam as incertezas da quantidade de água dos tributários do sistema de reservatórios, quanto para as incertezas dos dados de precipitação e temperatura, que influenciam a evapotranspiração e a vazão dos rios.

Esta técnica é bastante versátil sendo encontradas na literatura internacional diferentes abordagens para aplicação da mesma: a metodologia proposta por (Raso, Van De Giesen *et al.*, 2013), descreve uma técnica mais adequada para o tipo de problema abordado à otimização de reservatório para curto prazo, a qual se utiliza previsões em tempo real. Esta metodologia consiste em utilizar uma árvore de geração de estrutura de previsões de “ensembles” para controle em tempo em uma programação estocástica multiestágio. Através da árvore é possível observar quando as trajetórias das funções divergem entre si. Pode-se observar na Figura 2, que as trajetórias da função começam bastantes próximas no início do gráfico e posteriormente se divergindo conforme a escala de tempo avança.

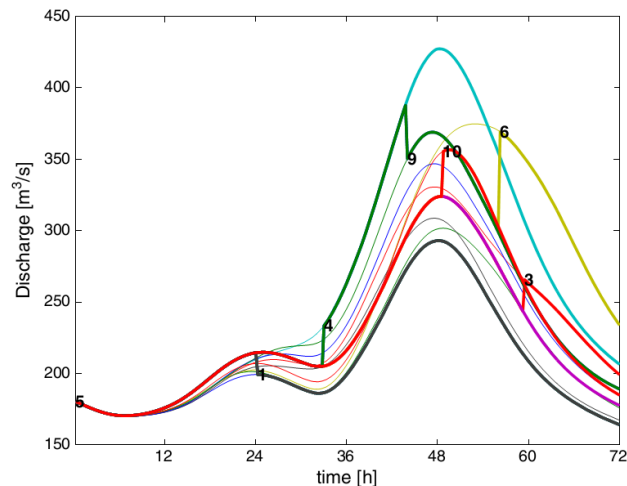


Figura 2 – Ensemble reduzido para Salzburg (linha fina), em 26/05/2011, 08:00 am e a árvore gerada a partir dela (linha grossa). (Raso, Van De Giesen *et al.*, 2013).

4.2. Model predictive control (MPC).

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 controlador PID (Controlador Proporcional Integral Derivativo) a um grande custos 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, Van Breukelen *et al.*, 2011).

Nestes casos aplica-se o Model Predictive Control (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.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas e ferramentas multiobjetivas e de curto-prazo para o gerenciamento de sistemas de reservatório de grande se mostram uma oportunidade atrativa para melhor gerenciamento dos recursos hídricos visando a geração de energia elétrica. O horizonte de previsão meteorológica de 20 dias, é uma grande fonte de incertezas na estratégia de gerenciamento, devido a estas incertezas existentes na previsão meteorológica, os métodos determinísticos utilizados, fornecem resultados não otimizados.

Por isso da importância de modelos como o Delft-FEWS aliado ao RTC-TOOLS que permitem 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 assimilação de dados é um fator fundamental para a implementação na prática dos MPCs, 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.

As empresas geradoras de energia deveriam focar no desenvolvimento procedimentos para previsão para transformar as probabilidades meteorológicas de previsão climática em regras de operação otimizada de reservatórios. Para tanto é imperativo criação de:

- a) Banco de Dados, que descrevem os processos de geração de energia, regras de comercialização de energia e redes de transmissão de energia e outros processos que representem alguma restrição no gerenciamento das hidrelétricas.
- b) Representação das incertezas, que é uma análise das fontes de imprecisões do sistema e descrições através do método de árvore de cenários não paramétricos, em particular para descrever incertezas meteorológicas derivadas de “ensembles” de previsão climática.
- c) Otimização Estocástica, desenvolvimento e implementação de algoritmos determinísticos e estocásticos, que servem para sustentar o gerenciamento integrado de curto prazo dos sistemas de energia.
- d) Identificar as flexibilidades operacionais análise de sensibilidade do sistema às restrições relacionadas aos diferentes cenários de vazão e carga.
- e) Elaboração dos algoritmos determinísticos e estocásticos efetivos para representação das incertezas meteorológicas na produção, carga e comercialização da energia;

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa e fomento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BERGSTRÖM, S. The HBV model. Computer Models of Watershed Hydrology. SINGH, V. P. Colorado: Water Resources Publications 1995.
- BERGSTRÖM, S.; FORSMAN, A. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. Nordic Hydrology 1973.
- BLIND, M.; GREGERSEN, J. B. Towards an Open Modelling INterface (OpenMI) the HarmonIT Project. Advances in Geosciences. 4 2005.
- BURNASH, R. J. C. The NWS river forecast system - catchment modeling. Computer Models of Watershed hydrology. SINGH, V. P. Colorado: Water Resources Publications 1995.
- BURNASH, R. J. C.; FERRAL, R. L.; MCGUIRE, R. A. A generalized streamflow simulation system - conceptual modeling for digital computers. 1973
- CARVALHO, N. O. Hidrossedimentologia Prática. Rio de Janeiro: CPRM/Eletróbrás, 1994.
- DELFT-FEWS Documentation. 2012.
- DENZER, R. Generic Integration of Environmental Decision Support System - State-of-the-art. Environmental Modelling & Software. 20 2005.

GREGERSEN, J. B.; GIJSBERS, J. A.; WESTERN, S. J. P. OpenMI: Open Modelling Interface. Journal of Hydroinformatics: IWA Publishing 2007.

http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=2163. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - Instituto Nacional de Pesquisas Energéticas 2010.

LABADIE, J. W. et al. Computerized Decision Support Systems for Water Managements. New York: ASCE, 1989.

LORENZ, E. N. Deterministic Nonperiodic Flow. Journal of The Atmospheric Sciences. 20 1963.

Plano Decenal de Expansão de Energia 2021. MME/EPE. 2012

RASO, L. et al. Tree structure from ensemble forecasts for real time control. HYDROLOGICAL PROCESSES 2013.

Relatório ANEEL 2011. Agência Nacional de Energia. Brasília. 2012

SCHWANENBERG, D. RTC-Tools Technical Reference & Configuration Guide Version 0.9 Beta (April 2010). Deltares, NL. 2009

SCHWANENBERG, D.; GALELLI, S.; SHERET, I. Nonlinear Model Predictive Control for Heterogeneous Process Models in Water Resources. 18th IFAC World Congress, 2011, Milano, Italia.

SCHWANENBERG, D. et al. Model Predictive Control for Pumps and Gates for Draining Dutch Polder Systems. 10th International Conference on Hydroinformatics, 2012, Hamburg.

_____. Adjoint Modeling Framework for Water Resources Models. 10th International Conference on Hydroinformatics, 2012, Hamburg.

SCHWANENBERG, D.; VAN BREUKELLEN, A.; HUMMEL, S. Data Assimilation for Supporting Optimum Control in Large-Scale River Networks. 2011 International Conference on Networking, Sensing and Control, 2011, Delft.

WERNER, M. et al. The Delft-FEWS flow forecasting system. Environmental Modelling & Software 2012.