GUILHERME DE LIMA

**“Riverhelp!” Sistema de Suporte a Decisões para
Planejamento e Gerenciamento Integrado de
Recursos Hídricos.**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Engenharia (Hidráulica e Saneamento).

Área de concentração: Hidráulica e Saneamento
Orientador: Prof. Frederico Fábio Mauad

São Carlos
2007

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GUILHERME DE LIMA**

Tese defendida e julgada em 31/08/2007 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **FREDERICO FABIO MAUAD (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Titular **MARCELO PEREIRA DE SOUZA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Titular **SWAMI MARCONDES VILLELA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **CARLOS DE OLIVEIRA GALVÃO**
(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

Aprovado

Prof. Dr. **AUGUSTO NELSON CARVALHO VIANA**
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

Aprovado

Prof. Associado **MARCELO ZAIAT**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus adorados pais,
Darlan e Edna, e à minha amada esposa,
Gabriela, pelo incansável incentivo, paciência
e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da EESC-USP e a todos os professores, funcionários e colegas que de alguma maneira me ajudaram na realização deste trabalho, em especial a Pavi, Sá e Rose pelo apoio e paciência no preenchimento dos inúmeros documentos e Betão e Miro pela amizade e ajuda no trabalho de campo.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa Científica) pela concessão das bolsas de doutorado no Brasil e no Exterior.

Ao professor e grande amigo Frederico Fábio Mauad que me aceitou como aluno de mestrado e de doutorado, que permitiu que eu fosse para a Dinamarca e que me ajudou e incentivou muito durante os últimos seis anos.

Ao professor Swami M. Villela pelos valiosos ensinamentos, ajuda e pelos dados fornecidos para a modelagem computacional.

Ao meu orientador na Dinamarca, Roar Askaer Jensen, por ter me passado conhecimentos técnicos-científicos valiosos e por ter contribuído com inúmeras idéias e sugestões para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao instituto DHI Water and Environment pela licença gratuita do software MIKE BASIN e pela oportunidade de realização do estágio no exterior, que foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

A todos os funcionários do DHI Water and Environment, em especial a Karl J. Hollenbeck, Nick Ahrensberg e Anja, Torkil Jønch-Clausen, Hanne Berthelsen, Jens Kirkegaard, Berry Elfrink, Louise Korsgaard, Henrik Larsen, Roar Askær Jensen, Alejandro E. Lasarte, Niels H. Ipsen, Karsten Havnø, Diego Rodrigues, Flemming T. Hansen, Jesper Overgaard, Jennifer Oakley, Mario T. Sales, Henrieta e Martin Ivan, Bjarne Jensen, Margit Ohn Jensen, Miriam Feilberg e Palle Lindgaard Jørgensen.

Aos meus amigos do SHS, Marcio R. Salla, José Eduardo, Alexandre K. Soares, Sergio L. S. Moreira, Gustavo H. R. da Silva, Luciana Peixoto, Liliane e Adelenia G. Maia, pelas idéias e informações trocadas.

Aos meus pais, Darlan e Edna, que me incentivaram muito e me deram, além da ajuda financeira, tranquilidade e conforto para poder realizar este trabalho.

À minha esposa, Gabriela, que sempre teve paciência e que me apoiou e ajudou muito a desenvolver esta pesquisa.

RESUMO

LIMA, G. D. **“Riverhelp!” Sistema de Suporte a Decisões para Planejamento e Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos.** Tese (Doutorado em Engenharia – Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

Esta pesquisa apresenta um Sistema de Suporte a Decisão (SSD) para o planejamento e gerenciamento integrado de bacias hidrográficas, denominado “Riverhelp!”, e também sugere nova metodologia para o uso desse tipo de ferramenta de análise. O objetivo geral é desenvolver um SSD que possa auxiliar a gestão de recursos hídricos. Para isso o SSD utiliza e integra tecnologias avançadas em um só sistema computacional flexível e que pode ser utilizado e entendido por especialistas e outros participantes do processo decisório. O programa é composto por quatro módulos principais e tem código aberto baseado na tecnologia OpenMI o que permite aos usuários alterar e incluir funções. Outra propriedade que merece destaque é sua completa integração com um sistema de informações geográficas permitindo a análise temporal e espacial da bacia hidrográfica. Essa ferramenta pode, por exemplo, ser usada para análises de disponibilidade de água em quantidade e qualidade, para o estudo de ecossistemas, para a otimização e operação de reservatórios e para auxiliar no processo de outorga de direito de uso da água. Uma aplicação do “Riverhelp!” para as Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí ilustra as diversas possibilidades de uso do sistema. Os resultados dessa investigação reforçam a importância e a necessidade de uma nova geração de SSD que considerem e analisem de maneira integrada os complexos assuntos relacionados à gestão da bacia hidrográfica. O desenvolvimento do “Riverhelp!” contribui significativamente para o avanço das pesquisas relacionadas ao tema de planejamento e gerenciamento integrado de recursos hídricos fornecendo um SSD com características únicas, que associa ferramentas para avaliação ambiental, modelos de simulação e otimização de qualidade e quantidade de água superficial e subterrânea, sistema de informações geográficas, diferentes bancos de dados, funções para análises estatísticas e técnicas multiobjetivo para análise de cenários.

Palavras-chave: Riverhelp, SSD, SIG, modelos de planejamento de recursos hídricos, Mike Basin.

ABSTRACT

LIMA, G. D. **“Riverhelp!” Decision Support System for Integrated Water Resources Planning and Management.** Thesis (Doctorate in Engineering – Hydraulics and Sanitation) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

This research presents a Decision Support System (DSS) for integrated water resources planning and management (IWRM) named “Riverhelp!” and suggests new methodology for the use of this kind of analysis tool as well. The general goal is to develop an appropriate DSS that can help IWRM process. In order to do so, the DSS uses and combines advanced technologies and techniques currently available. It integrates different methodologies in just one computational system, which is flexible and can be used and understood not only by specialists but also by general users who are not familiar with modelling. The DSS “Riverhelp!” has four main building blocks and an open computational core based on the OpenMI technology which allows users to access it programmatically and to add new tools or to change computations in almost any way they want. Another important characteristic is that the DSS “Riverhelp!” is fully integrated with a Geographic Information System (GIS). Most of all, it puts time and spatial information together and is therefore a great package for data management of river basins. This system can be used for hydrological analyses, assessment of water availability, water resources planning, water quality and quantity studies, reservoir systems nonlinear optimization and so on. In this research a “Riverhelp!” application for the Piraciaba, Capivari and Jundiá River Basins shows several possibilities for its use. The results of this study emphasize the importance and necessity of a new generation of Decision Support Systems that are able to analyze and take into account the complex issues associated to river basin management in an integrated approach. The “Riverhelp!” development makes significant contributions for research advance in the integrated water resources planning and management field providing a DDS with unique characteristics that combines environmental assessment tools, water quality and quantity simulation and optimization models for surface water and groundwater, geographic information system, sophisticated databases, statistical tools and multicriteria techniques for scenario analyses.

Key words: Riverhelp, DSS, GIS, river basin management models, Mike Basin.

SUMÁRIO

Resumo	pág. 9
Abstract	pág. 11
1 Introdução.....	pág. 17
2 Revisão de literatura	pág. 25
2.1 Água e o desenvolvimento sustentável.....	pág. 25
2.2 Sistemas de suporte a decisão.....	pág. 32
2.2.1 Modelos matemáticos de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos.....	pág. 41
2.2.2 Sistemas de informação geográfica (SIG)	pág. 54
2.2.3 A linguagem de programação Visual Basic	pág. 57
2.2.4 Técnicas de otimização e análise multiobjetivo	pág. 58
2.2.5 SSD e a participação pública no processo de tomada de decisão.....	pág. 63
2.2.6 Modelagem integrada de sistemas hídricos.	pág. 66
2.2.7 Aplicações de SSD para recursos hídricos	pág. 69
2.3 Considerações sobre a revisão de literatura.....	pág. 79
3 Metodologia.....	pág. 81
3.1 Estrutura e apresentação do SSD Riverhelp!.....	pág. 81
3.1.1 Módulo 1 – Interface principal	pág. 83
3.1.1.1 Função Wriam	pág. 85
3.1.1.2 Função Simular/Otimizar	pág. 93
3.1.1.3 Função Condições Hidrológicas.....	pág. 94
3.1.1.4 Função Demandas / Usuários	pág. 94
3.1.1.5 Função Lançamentos / Qualidade.....	pág. 95
3.1.1.6 Função Reservatórios	pág. 96
3.1.1.7 Função Links	pág. 97
3.1.1.8 Função Resultados.....	pág. 98
3.1.1.8.1 Índices de desempenho.....	pág. 104
3.1.1.9 Função Análise de Cenários	pág. 107
3.1.1.9.1 Método AHP (Analytical Hyerarchy Process)	pág. 108
3.1.2 Módulo 2 – Interface para gerenciamento de dados.....	pág. 118
3.1.2.1 Função Postos Fluviomentricos.....	pág. 119
3.1.2.2 Função Usuários	pág. 120
3.1.2.3 Função Reservatórios	pág. 120
3.1.3 Módulo 3 – Sistema de informações geográficas	pág. 121
3.1.4 Módulo 4 – Modelo de planejamento de bacias hidrográficas.....	pág. 124
3.1.4.1 Características principais do MIKE BASIN.....	pág. 125
3.1.4.2 Dados de entrada	pág. 128
3.1.4.3 Delimitação de bacias hidrográficas.....	pág. 130
3.1.4.4 Escoamento em rios e canais	pág. 132
3.1.4.5 Reservatórios	pág. 134
3.1.4.6 Usos de água.....	pág. 137
3.1.4.7 Modelo de qualidade da Água.....	pág. 138
3.1.4.8 Modelo de água subterrânea	pág. 142
3.1.4.9 Modelo hidrológico - NAM.....	pág. 143

3.1.4.10 Otimização.....	pág. 145
3.1.4.11 Apresentação dos resultados.....	pág. 147
3.1.4.12 Análise de séries históricas - Temporal Analyst	pág. 148
3.1.4.13 Referências de projetos e publicações	pág. 152
3.2 Metodologia para uso do SSD Riverhelp!.....	pág. 153
3.2.1 Primeira fase (1ª. Fase).....	pág. 154
3.2.2 Segunda fase (2ª. Fase).....	pág. 155
3.2.3 Terceira fase (3ª. Fase)	pág. 155
3.2.4 Proposta para uso “Online” do SSD Rivehelp!	pág. 156
 4 Aplicação do SSD Riverhelp!.....	 pág. 159
4.1 Caracterização geral do local de estudo	pág. 160
4.2 Aplicação do Wriam – 1ª. Fase	pág. 162
4.3 Modelagem da bacia hidrográfica – 2ª. Fase.....	pág. 163
4.3.1 Coleta e análise de dados.....	pág. 163
4.3.2 Modelagem do sistema hídrico.....	pág. 170
4.4 Uso do SSD Riverhelp! – 3ª. Fase.....	pág. 175
4.4.1 Simulações da quantidade e qualidade da água.....	pág. 176
4.4.2 Otimização dos principais reservatórios Sistema Cantareira	pág. 185
4.4.3 Limitações da modelagem.....	pág. 196
 5 Conclusões e recomendações	 pág. 197
5.1 Conclusões.....	pág. 197
5.2 Recomendações	pág. 202
 Referências Bibliográficas.....	 pág. 205
 Apêndice A	
Exemplo de aplicação do WRIAM.....	pág. 221
 Apêndice B	
Documentos enviados ao comitê de bacia PCJ	pág. 231
 Apêndice C	
Exemplo de acesso ao código do MIKE BASIN.....	pág. 239
 Apêndice D	
Informações sobre a coleta de dados no campo	pág. 247
 Anexo E	
Dados originais das barragens do Sistema Cantareira.....	pág. 261