



Larissa Figueiredo Terra de Faria

Otimização de Estudos de Inventário Hidroelétricos

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Álvaro de Lima Veiga Filho

Rio de Janeiro
Março de 2011



Larissa Figueiredo Terra de Faria

Otimização de Estudos de Inventário Hidroelétricos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Álvaro de Lima Veiga Filho
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Rafael Kelman
PSR Consultoria

Prof. Alexandre Street de Aguiar
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 17 de março de 2011

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Larissa Figueiredo Terra de Faria

Graduou-se em Engenharia de Produção Elétrica e em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Apoio à Decisão pela PUC-Rio em 2008. Atua na empresa PSR Soluções e Consultoria em Energia Ltda, onde participa da concepção e implementação de modelos de previsão de séries temporais e de otimização do potencial hidroelétrico através de estudos de inventário, tema desta dissertação.

Ficha Catalográfica

Faria, Larissa Figueiredo Terra de

Otimização de Estudos de Inventário Hidroelétricos / Larissa Figueiredo Terra de Faria ; orientador: Álvaro de Lima Veiga Filho. – 2011.

80 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Otimização. 3. Estudos de inventário. 4. Hidroelétricos. I. Veiga Filho, Álvaro de Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, Luiz Paulo Terra de Faria e Cynthia Figueiredo Terra de Faria, e ao meu irmão Lucas Figueiredo Terra de Faria, que são tudo para mim.

Agradecimentos

A toda minha família, em particular aos meus pais, Luiz Paulo e Cynthia, e ao meu irmão, Lucas, por todo amor, carinho e apoio em todas as fases da minha vida. Sem eles, a vida não teria a mesma graça e eu não seria quem sou hoje.

Ao Rafael Kelman, pela atenção, confiança, segurança, motivação e conhecimentos transmitidos, desde o período de estágio até hoje. Agradeço pela excelente e presente orientação em todas as etapas deste trabalho.

Ao Mário Veiga Ferraz Pereira, pela oportunidade concedida, excelente orientação e pelos ensinamentos e aprimoramentos acadêmicos e profissionais.

Ao orientador Álvaro Veiga Filho, pela motivação, ensinamentos e oportunidades concedidas durante minha vida acadêmica.

Ao Augusto da Cunha Reis, pelo apoio, carinho, companheirismo e amor, e por não me deixar desistir de dar este importante passo para a minha carreira.

Às minhas grandes amigas, Livia Marques da Silva Gama, Lize Dias da Cunha, Paula Maurício Nunes e Clarissa Costalonga e Gandour, por se fazerem presentes tanto nos momentos bons como nos difíceis, e pelo apoio nestas (e em todas as outras) fases da minha vida.

Aos meus grandes amigos, Vinícius Costa Villas Bôas Segura e Jan Krueger Siqueira, por essa amizade que não tem tamanho e pelo apoio contínuo desde os tempos da graduação, de incontáveis maneiras.

A todos os amigos da PSR, em especial a Martha Carvalho, Juliana Pontes e Paula Valenzuela, pelo apoio e pela força que me passavam a cada dia e por acreditar que tudo ia dar certo no final.

À PUC-Rio, pelo ótimo ambiente de estudo.

Resumo

de Faria, Larissa Figueiredo Terra; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Orientador). **Otimização de Estudos de Inventário Hidroelétricos**. Rio de Janeiro, 2011. 80p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O desenvolvimento de estudos de inventário para Pequenas Centrais Hidroelétricas – PCHs – é uma atividade custosa e demorada. A motivação desta dissertação é, de forma rápida e econômica, verificar a real viabilidade destes projetos. Um modelo computacional foi criado para automatizar estudos de inventário, identificando o potencial de geração hidroelétrica e os locais de instalação dos projetos. A partir da identificação do potencial, é estudada a definição de possíveis eixos de barramento, ou seja, resolve-se o problema da divisão de quedas para um determinado rio. Este trabalho, então, discute a implementação de um modelo para avaliação do potencial hidroelétrico que seleciona e dimensiona projetos hidroelétricos em uma bacia hidrográfica. Este potencial é desenvolvido baseando-se na maximização do benefício líquido, e inclui restrições sócio-ambientais que podem ser adaptadas a diferentes regulamentos locais. Através desta automatização, espera-se reduzir os riscos de empresários investirem uma quantidade de dinheiro significativa em bacias hidrográficas pouco promissoras.

Palavras-chave

Estudos de inventário; potencial de geração hidroelétrica; divisão de quedas; otimização; pequenas centrais hidroelétricas.

Abstract

de Faria, Larissa Figueiredo Terra; Veiga Filho, Álvaro de Lima (Advisor). **Optimization of Hydroelectric Inventory Studies**. Rio de Janeiro, 2011. 80p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The development of inventory studies for Small Hydropower Plants is a costly and time consuming activity. The motivation of this dissertation is to, quickly and economically, verify the true viability of these projects. A computational model was created to automate inventory studies, identifying the hydroelectric generation potential and the projects' installation sites. After the identification of the potential, the definition of project siting and project sizing is studied. In other words, the model determines the most adequate sites to build dams among several candidate locations and, for each selected case, the plant design (gross head, installed capacity, reservoir size and others). This potential is developed through the maximization of total net benefit, and includes environmental constraints that can be adapted to different regulations. Through this automation, the risks for entrepreneurs investing a significant amount of money in unpromising river basins are expected to reduce.

Keywords

Inventory studies, hydroelectric generation potential, plant design, optimization, small hydropower plants.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	11
2 ESTUDOS DE INVENTÁRIO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS	15
2.1. HIDROELETRICIDADE	15
2.2. PEQUENAS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS	17
2.2.1. Aspectos regulatórios	18
2.3. DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DA BACIA HIDROGRÁFICA	19
2.3.1. O Manual de Inventário	20
2.3.2. Potencial Hidroelétrico Remanescente	21
2.4. OTIMIZAÇÃO DE ESTUDOS DE INVENTÁRIO	22
2.4.1. Bases de Dados Públicas e Gratuitas	27
2.4.1.1. Estabelecimento do Regime Hidrológico	27
2.4.1.2. Caracterização da Topografia da Região	31
2.4.2. SISO RH: O Módulo de Custos	32
2.4.2.1. Integração entre o SISO RH e o Modelo Proposto	33
3 MODELO DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROELÉTRICO	35
3.1. PROCESSAMENTO DO GDEM	35
3.2. CUSTOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	36
3.3. CÁLCULO DA POTÊNCIA INSTALADA E ENERGIA PRODUZIDA	40
3.4. CUSTOS AMBIENTAIS	42
3.5. O MODELO DE OTIMIZAÇÃO	43
3.6. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	44
3.7. COMPONENTES DO MODELO	50
3.8. RESULTADOS DO MODELO E TRATAMENTOS ORIGINAIS	51
3.9. RESSALVAS DO MODELO	51
4 ESTUDO DE CASO	53
4.1. REVISÃO DO INVENTÁRIO DO PARAÍBA DO SUL	53
4.2. RESULTADOS	55
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	60
5.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	61
5.1.1. Automatização de séries de vazões afluentes aos aproveitamentos	61
5.1.2. Processamento paralelo	62
5.1.3. Integração com o GIS	63
5.1.4. Automatização de projetos de Engenharia	65
5.1.5. Processamento gráfico	67
5.1.6. Usos múltiplos da água	67
5.1.7. Inventário de usinas com reservatórios	68
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
7 ANEXO A: DETALHAMENTO DO MÓDULO DE CUSTOS – SISO RH	74
7.1. CRIAÇÃO DO SISO RH	74
7.1.1. O Cálculo Automático de Índices	77
7.1.2. A Incorporação de Orçamentos Cadastrados	78
7.1.3. Atualização de Custos	78
7.1.4. A Geração de Tabelas para a Análise de Orçamentos	79

Lista de figuras

Fig.1	Duas alternativas para o desenvolvimento de projetos hidroelétricos em cascata.	12
Fig.2	Estágio do desenvolvimento hidroelétrico ao redor do mundo.	16
Fig.3	Função não-convexa.	24
Fig.4	Possíveis soluções para o problema de otimização.	25
Fig.5	Função não-convexa aproximada para uma função linear por partes.	26
Fig.6	Fluxograma simplificado que indica as entradas do modelo.	27
Fig.7	Ciclo hidrológico da água.	29
Fig.8	Processos do ciclo hidrológico.	30
Fig.9	Camada de curvas de nível, mostrada pelo Google Earth.	35
Fig.10	Exemplo da seção transversal de uma barragem de concreto.	37
Fig.11	Modelo de seção específico para cálculo do volume de concreto.	37
Fig.12	A decisão da potência instalada, baseada em uma análise de custo-benefício.	41
Fig.13	Conjunto de projetos candidatos.	43
Fig.14	Custos totais, para um local candidato, em função da altura de queda.	46
Fig.15	Anuidades de benefício líquido.	46
Fig.16	Aproximação da função não-côncava de benefício líquido.	48
Fig.17	São incluídas restrições para impedir que um reservatório inunde outro.	49
Fig.18	Fluxograma dos componentes do modelo.	50
Fig.19	Localização do estudo de caso.	53
Fig.20	Dados de vazão média mensal para o trecho estudado do rio.	54
Fig.21	Perfil longitudinal do rio.	56
Fig.22	Mapa regional.	56
Fig.23	PCH no local 5 e interferências locais.	57
Fig.24	Detalhe da PCH implantada na seção 38 e interferências locais.	57
Fig.25	Detalhe da PCH na seção 54 e interferências locais.	58
Fig.26	Detalhe da PCH na seção 62 e interferências locais.	58
Fig.27	Detalhe da PCH na seção 75 e interferências locais.	59
Fig.28	Detalhe da PCH na seção 89 e interferências locais.	59
Fig.29	Fluxo de dados no SISOH.	75
Fig.30	Fluxo de dados no SISOH, versão 5.0.1.	76

Lista de tabelas

Tabela 1.	Solução Ótima	55
-----------	---------------------	----