

5

Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Este trabalho discutiu 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.

Para o desenvolvimento do modelo deste trabalho, foram adotados regulamentos nacionais, que podem obviamente ser adaptados para as realidades regionais.

A execução de um modelo deste tipo é justificada pela importância da hidroeletricidade no cenário mundial e necessidade de elaboração de estudos de inventário no Brasil como primeiro passo para a construção de novas usinas hidroelétricas. Há um potencial enorme ainda inexplorado, principalmente no bloco de países em desenvolvimento, o Brasil inclusive.

Como visto, o modelo automatiza a elaboração de estudos de inventário hidroelétricos com informações “de escritório”. Foi discutido também o mercado brasileiro de Pequenas Centrais Hidroelétricas, antes desprezado, atualmente em efervescência. Também foi comentada a importância de saber se o local para construção de uma PCH é ambientalmente e economicamente viável antes de investir em pesquisas de campo, por conta dos custos dos estudos de inventário completos, que não são proporcionalmente maiores que para o caso de grandes projetos de geração de energia.

O desenvolvimento integrado da bacia hidrográfica é importante de modo a atingir melhores benefícios globais para o consumidor a longo prazo (isto é, mais energia a menor custo). A viabilidade da criação deste modelo foi comprovada, graças à base de dados pública e gratuita da NASA e ao módulo de custos SISORH.

Um estudo de caso para um trecho do Rio Paraíba do Sul serviu de *benchmarking*, pois os resultados obtidos para este estudo foram semelhantes ao inventário completo feito de acordo às normas e exigências da ANEEL.

Diversos desenvolvimentos futuros poderão ser feitos ao modelo. Dentre os temas identificados como promissores estão: (i) processamento paralelo, (ii) visualização gráfica dos resultados, (iii) inclusão de reservatórios de acumulação na modelagem matemática, (iv) seleção de funções multi-critério para o caso de usos múltiplos de recursos hídricos, (v) ampliação dos arranjos de usinas e, finalmente, (vi) busca da automatização dos projetos de Engenharia. Todos estes desenvolvimentos são discutidos a fundo na seção seguinte.

5.1.

Desenvolvimentos Futuros

Há inúmeras possibilidades de extensão do modelo apresentado nesta dissertação uma vez que estudos de inventário demandam diferentes tipos de informação que podem ser eficientemente processadas com diferentes ferramentas analíticas. A seguir ilustramos algumas das possibilidades que serão exploradas como desdobramentos naturais deste trabalho.

5.1.1.

Automatização de séries de vazões afluentes aos aproveitamentos

A automatização do cálculo das séries de vazões afluentes a partir de informações disponíveis (registros de chuvas e vazões históricas) é uma extensão natural. Esta atividade pode ser desmembrada em duas sub-tarefas: havendo disponibilidade de séries de vazões em locais próximos aos aproveitamentos sendo estudados, a regionalização hidrológica pode ser implementada a partir de técnicas estatísticas (i.e. regressões). Não estando disponíveis estas informações, técnicas alternativas precisam ser empregadas, entre elas o emprego de modelos físicos de escoamento superficial que traduzem precipitação (informação mais abundante) em vazão.

Estes modelos precisam ser “calibrados” com eventos históricos (chuva e vazão) em alguns postos hidrométricos. O objetivo desta etapa é reproduzir com o modelo a vazão histórica (“função resposta”). A partir daí, a aplicação do modelo é imediata: utilizar as informações de precipitações e características locais (declividade, cobertura vegetal, solo, etc.) para inferir as vazões em diversos

pontos da região de interesse. Feito isto, recaímos sobre o caso anterior (vazões disponíveis), e a regionalização pode ser feita, ou, alternativamente, o próprio modelo chuva-vazão pode ser empregado para construir a série temporal de vazões no local sendo estudado.

5.1.2.

Processamento paralelo

Como o pré-processamento do modelo digital de terreno em um determinado local é independente do pré-processamento dos locais restantes, uma alternativa interessante para acelerar o esforço computacional é o processamento paralelo, em que são utilizados clusters de computadores. Ao invés da máquina ter que esperar o resultado do local i para então partir para o pré-processamento do local $(i+1)$, todos os locais poderiam ser pré-processados em paralelo, o que certamente diminuiria o tempo computacional para obtenção da solução do problema.

Uma plataforma de computação distribuída voltada para clusters e para o processamento de grandes massas de dados pode ser utilizada. Uma das plataformas mais utilizadas é a Hadoop [18], da “The Apache Software Foundation”, que é financiada principalmente pela Google.

Um cluster, por sua vez, é um conjunto de máquinas homogêneas, ou seja, que possuam algumas características em comum entre si (o sistema operacional de todas é o Windows, ou o Linux, ou são todas máquinas 32 bits, ou 64 bits, por exemplo).

A ideia é quebrar um problema (separável) em vários outros problemas independentes e entregar cada “fatia” para uma máquina diferente processar. A máquina-mãe aloca as outras máquinas (map) e, após o processamento, reúne os resultados do problema do cluster como um todo (reduce).

As unidades de processamento gráfico (GPUs) comuns em videogames ou computadores dedicados a aplicativos 3D (jogos, animação gráfica, processamento CAD, dentre outros) têm evoluído bastante nos últimos anos.

Recentemente estas placas ofereceram interfaces de programação de aplicativos (APIs) que permitem uma interação com desenvolvedores destes aplicativos. A NVIDIA, por exemplo, lançou a API CUDA, que tem sido utilizada

tanto para o processamento gráfico e visualização (produtos GeForce e Quadro), como científico (produto Tesla), sendo este último projetado especificamente ao processamento paralelo. Esta combinação de emprego de GPUs para o processamento paralelo utilizando APIs é um caminho igualmente promissor para o ganho de produtividade do modelo desenvolvido nesta dissertação.

Como o objetivo é aplicar o modelo para bacias hidrográficas com rios de centenas de quilômetros de extensão, tanto no Brasil, como no exterior, o número de alternativas a serem processadas é proibitivo para uso em um processamento serial num único computador.

O processamento das informações do modelo digital de terreno e a estimativa de orçamento de cada projeto de usina investigado (local candidato, altura de queda, arranjo de engenharia) podem ser feitos de forma independente, ou seja, os processos podem ser paralelizados, e ganhos adicionais podem ser obtidos com o uso de GPUs a partir da integração via APIs.

5.1.3.

Integração com o GIS

A integração do modelo a um sistema de informação geográfico (GIS), utilizando os recursos específicos disponíveis, tais como modelos de chuva-vazão [33][40], identificação automática de bacias e sub-bacias do modelo digital de terreno e outros, é mais uma possibilidade promissora.

O sistema geográfico mais utilizado atualmente é conhecido como ArcGIS. O ArcGIS é construído em torno de uma base de dados geográficos, que usa uma abordagem de banco de dados objeto-relacional para guardar dados espaciais. Uma base de dados geográficos é um “recipiente” para guardar conjuntos de dados, alocando os recursos espaciais como atributos. A base de dados geográfica pode também conter informação da topologia e pode modelar o comportamento dos recursos, tais como cruzamentos de rodovias, com regras que indicam como os recursos se relacionam entre si [38]. Ao trabalhar com base de dados geográficos, é importante entender o conceito de classes de recursos, que são conjuntos de recursos, representados por pontos, linhas ou polígonos. Uma base de dados geográfica pode guardar múltiplas classes de recursos ou tipos de recursos em um mesmo arquivo [12].

Com a integração a um GIS, será possível visualizar, no mesmo plano, informações de topografia e de possíveis interferências aos reservatórios criados pelas usinas hidroelétricas candidatas, como rodovias, ferrovias, pontes, áreas urbanas ou rurais e etc. O GIS também pode ser útil na visualização de interferências que podem ter impactos econômicos severos aos projetos ou mesmo inviabilizá-los, como, por exemplo, parques indígenas, áreas de conservação e etc. Com o GIS, é possível também gerar as curvas de nível para a área de estudo.

Um sistema de informação geográfico para recursos hídricos, que opera dentro do ArcGIS chamado de Arc Hydro [24] também pode ser integrado ao modelo proposto nesta dissertação. O Arc Hydro representa dados de hidrografia e hidrologia, criando uma base para obter um entendimento mais profundo de sistemas hídricos superficiais. O Arc Hydro possui camadas temáticas, que representam:

- A cartografia e a análise de rios e riachos;
- Estações hidrológicas em uma bacia hidrográfica;
- Áreas de drenagem, que podem ser usadas para estimar a vazão em rios, como discutido anteriormente;
- A visualização da camada hidrográfica em mapas topográficos;
- A análise hidráulica, proporcionando a visualização de canais;
- O mapa cartográfico da superfície do terreno;
- Dados fluviométricos, que podem ser usados para estimar dados de vazão ou condições de alagamento ou seca;
- O mapa, via satélite, da região.

Com este poder de visualização, o Arc Hydro representa os dados disponíveis de recursos hídricos de maneira organizada e abre o caminho para a construção de sistemas de informação hidrológicos que sintetizem dados de recursos hídricos geoespaciais e temporais, garantindo uma boa análise e modelagem hidrológica [24].

Se não existirem dados de vazão para os locais candidatos à implantação de usinas, uma identificação automática de bacias e sub-bacias ajudaria o usuário a encontrar locais próximos aos candidatos, que possuam dados de vazão. Com estes dados, é possível inferir os dados de vazão nos locais desejados, usando

modelos chuva-vazão ou relações de áreas de drenagem ou análises de regressões, como mencionado anteriormente. Para o Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) tornou público um sistema de informações hidrológicas, conhecido como HidroWeb [19]. Este sistema dispõe de dados brasileiros hidrológicos, que podem ser pesquisados por bacia, sub-bacia, rios, estados, municípios, entidades, estações e séries hidrológicas. Ele pode fornecer as informações de dados de vazões para os locais candidatos ou para locais identificados pelo GIS como interessantes para realizar a transposição de dados.

5.1.4.

Automatização de projetos de Engenharia

O aproveitamento de um curso d'água para a geração de energia elétrica através da construção de uma usina hidroelétrica convencional é concebido segundo os arranjos tradicionais:

- Usina com Casa de Força Integrada a Barragem: este tipo de usina dispensa a estrutura de adução da água às máquinas, sendo constituída basicamente por barragem, tomada d'água, vertedouro e casa de força;
- Usina com Casa de Força ao pé da Barragem: este tipo de usina exige a implantação de estruturas para adução da água às turbinas, sendo constituída por todas as estruturas do tipo anterior, mais os condutos forçados;
- Usina com Derivação: a principal característica deste tipo de usina é que a casa de força situa-se distante da barragem, exigindo, além dos dispositivos já vistos, a implantação de estruturas de derivação da água até a casa de força, e eventuais acessórios. Geralmente as estruturas de derivação são constituídas por túneis, canais, dutos a baixa pressão (galerias) ou uma combinação destes. Eventualmente também é necessária a instalação de um dispositivo para alívio de pressões (chaminé de equilíbrio), se a relação entre o comprimento do conduto forçado e a queda bruta for elevada. Usualmente, câmaras de carga são instaladas para fazer a transição entre o escoamento à superfície livre, no canal de adução, e o escoamento sob pressão no conduto forçado.

Nos 3 tipos de Arranjos de UHE's referidos acima de forma sucinta, a magnitude dos recursos financeiros envolvidos deve ser suficiente para amparar custos diretos e indiretos incorridos nas etapas de estudos, projetos, implantação, operação, manutenção e conservação [30].

Como mencionado, o estudo de caso apresentado nesta dissertação admitiu um tipo de arranjo (usina de concreto com a casa de força ao pé da barragem). Portanto, as estimativas de orçamentos foram feitas considerando-se este layout.

Será importante, sobretudo para aplicação em pequenas centrais hidroelétricas, desenvolver arranjos derivativos, e estimar em cada caso o custo deste arranjo de maneira a permitir ao modelo de otimização realizar o “tradeoff” entre este custo (tanto maior quanto maior for a derivação de forma a aumentar a queda obtida) e o benefício do ganho energético.

Em termos gerais, o modelo terá diferentes arranjos que serão investigados sob o ponto de vista econômico: (i) implantar usinas ao pé da barragem, utilizando a altura de queda original do local escolhido (e, portanto, a potência instalada cabível a esta altura) ou (ii) alternativa com custos do sistema de derivação (canais a céu aberto ou túneis) e, como no caso anterior, “varrer” diferentes alternativas variando a queda bruta obtida em cada caso, e conseqüentemente a potência instalada. O modelo proposto também pode ser estendido de forma a automatizar os projetos de Engenharia solicitados em estudos ao nível de inventário.

Os desenhos apresentados nesta dissertação para o estudo de caso do Rio Paraíba do Sul foram calculados automaticamente pelo modelo em seu estágio atual, uma vez encontrada a solução do problema. Planeja-se que, além da planta de localização, com exibição do reservatório, seja possível também gerar automaticamente plantas exigidas pela ANEEL nos estudos de inventário, que incluem detalhe do reservatório, corte do reservatório, corte da tomada d'água e casa de força (exibindo o conjunto turbina-gerador) e corte do vertedouro. Para tal, será necessário contar com um banco de dados de desenhos de vertedouros, diversos tipos de turbinas (Francis, Kaplan, Pelton, Turgo, etc.) que deverão, caso a caso, ser corretamente localizados nas seções transversais e dimensionados, de acordo com os cálculos feitos pelo Sisorh [11] (que, por sua vez, faz um pré-dimensionamento com as equações do Manual de Inventário do MME [28]).

5.1.5.

Processamento gráfico

A parte de processamento e visualização gráfica dos resultados pode ser desenvolvida para garantir exibição 3D das barragens sobrepostas a imagens de satélite, permitindo com facilidade identificar as áreas inundadas pelos reservatórios e as interferências que precisaram ser resolvidas pela Engenharia.

O software AutoCad [9] pode criar modelos tridimensionais, tornando ainda mais interessante a visualização dos resultados encontrados. Será possível apresentar desenhos tridimensionais ao usuário, como por exemplo os projetos de usina em cada local selecionado. Com o avanço da televisão 3D, as imagens criadas pelo AutoCad poderão ser projetadas em três dimensões.

5.1.6.

Usos múltiplos da água

A função objetivo do modelo descrito neste trabalho pode ser estendida para contemplar os usos múltiplos da água. Um reservatório, além de aumentar a energia firme do sistema, aumenta também a vazão regularizada a jusante, que pode servir para o abastecimento rural ou urbano, para a viabilização de projetos de irrigação, navegação, e até recreação/turismo. Esta regularização pode se tornar ainda mais crítica se existe um projeto de derivação de águas do rio para uma bacia vizinha, por exemplo.

Com isto, o modelo se posicionaria também como ferramenta de desenvolvimento dos recursos hídricos de uma bacia, abordagem mais abrangente que o enfoque atual, que contempla unicamente o componente da hidroeletricidade.

O valor econômico destes usos da água (além da hidroeletricidade, foco deste trabalho) também pode ser incluído na modelagem do programa, através de ajustes na função objetivo do problema e eventual inclusão de restrições.

5.1.7.

Inventário de usinas com reservatórios

A formulação atual contempla uma operação a fio d'água das usinas hidroelétricas; ou seja, reservatórios onde o nível d'água é mantido constante. Uma extensão importante é a incorporação de usinas hidroelétricas com reservatórios de acumulação, ou seja, que permitem o armazenamento da água em um instante do tempo para utilização posterior.

Este é um fator de grande aumento na complexidade da modelagem matemática do problema de otimização. As variáveis de decisão anteriores (queda bruta) precisam ser transformadas em volumes úteis através das curvas cota-volume em cada local. Assim, para cada queda bruta, há um volume útil correspondente. Mas neste caso, a vazão turbinada deixa de ser igual à vazão afluente em cada momento, limitada ao engolimento máximo. Esta característica (vazão turbinada ser igual à afluente) permitia que indicadores do projeto como a potência instalada, a energia média e a Garantia Física resultante, fossem pré-processados, o que simplificava a formulação do problema matemático. Este era expresso somente em termos de benefício líquido (o benefício era calculado pela receita proporcionada pela energia gerada) menos custo.

O caso com usinas de acumulação exige a inclusão de restrições e variáveis adicionais que permitam a modelagem das decisões de energia produzida e armazenada em cada momento. Assim, o volume armazenado em cada etapa do processamento é uma variável de decisão, mas o próprio volume útil também precisa ser decidido. E a energia produzida depende do produto entre vazão turbinada (agora uma variável de decisão) e a queda bruta (outra variável de decisão), o que torna o problema original não linear.

Além da complexidade provocada pela dependência entre vazões em períodos diferentes, ainda há a dependência espacial das vazões, pois os balanços hídricos em cada usina devem considerar as vazões que são liberadas pelas usinas a montante.

Em décadas passadas (antes do “boom” mundial da conscientização ambiental), as usinas eram construídas com reservatórios de acumulação, pois a visão da época era a de maximizar o potencial hidroelétrico, não havendo maiores preocupações com a área inundada. Nos dias de hoje, as usinas hidroelétricas que

conseguem licença ambiental são aquelas a fio d'água, e projetos que outrora previam reservatórios foram “repaginados” para arranjos com pequena área inundada e operação a fio d'água. De forma a minimizar os impactos ambientais associados às grandes áreas de inundação, as usinas que estão sendo licitadas, inclusive as de maior capacidade instalada (ex: Belo Monte, Jirau e Santo Antônio) são a fio d'água.

A usina de Belo Monte (Rio Xingu) é um bom exemplo, pois seu projeto de Engenharia foi completamente revisado. Adicionalmente, o potencial inventariado na década de 1980 no Rio Xingu (que previa usinas com reservatórios) foi revisado pela EPE, de forma a contemplar somente usinas a fio d'água. Neste caso particular do Rio Xingu, um rio que foi reinventariado para que as usinas se tornassem a fio d'água, a situação é ainda mais crítica: não será permitida a construção de nenhuma usina em adição a Belo Monte, mesmo a fio d'água, graças às restrições ambientais.

É claro que com esta decisão, o Brasil está esterilizando parte de seu potencial hidroelétrico, o que tem um impacto econômico. Ao impedir a construção de reservatórios, diminui-se a capacidade de armazenar a água de um período úmido para um período seco, o que aumenta a dependência de usinas termoelétricas de maneira a suprir a demanda no período seco, com custos de operação (queima de combustíveis fósseis) e liberação de gases de efeito estufa.

Portanto, torna-se importante equilibrar de forma racional o debate sobre o papel dos reservatórios. Hoje claramente o pêndulo está na linha de que eles não poderão mais ser construídos. O “tradeoff” entre o impacto local pela criação de um reservatório que exigirá desmatamento de uma certa área que será inundada (a supressão vegetal se tornou prática no setor para que a decomposição da vegetação inundada não produza gás metano, de alto poder de efeito estufa) e o ganho difuso da sociedade não está acontecendo em bases racionais. Via de regra, os interesses locais (populações atingidas e impactos sobre a cobertura vegetal) pesam mais que o benefício econômico e energético para a sociedade brasileira.

Desta forma, pelo menos no Brasil, a extensão da modelagem de forma a incluir os reservatórios de acumulação será principalmente a de quantificar a perda do potencial hidroelétrico em termos de capacidade instalada, mantida a tendência atual de construção somente de usinas a fio d'água. Como o crescimento da demanda por energia elétrica precisará ser atendido de qualquer

jeito, o modelo permitirá verificar o sobrecusto para a sociedade brasileira desta decisão.