

Anexo B Automatização de estudos de inventários hidrelétricos

Este anexo descreve o desenvolvimento de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) voltado para a automação de estudos de inventários hidrelétricos. O projeto foi proposto pela EDF Norte Fluminense para o Programa de P&D da ANEEL e executado pela PSR. O resultado do projeto foi uma ferramenta computacional denominada Hera (Hydropower and Environmental Resource Assessment) com diversos usos concebidos, tais como: o levantamento do potencial hidrelétrico de bacias (em qualquer parte do mundo) e a avaliação das consequências econômicas de restrições socioambientais (ex. interferências em áreas indígenas, unidades de conservação e virtual impedimento de estudos com reservatórios de regularização). O sistema computacional pode ser dividido em três componentes principais (Fig. B.1) integrados por uma interface gráfica amigável.

- a) Uso de modelo digital de terreno (MDT) com base em fontes públicas (ex.: SRTM, NASA) ou informações topográficas de bacias hidrográficas, disponíveis após levantamentos de campo e aerofotogrametria. Nessa fase são desenvolvidas atividades de pré-processamento do MDT, por exemplo: a extração da rede de drenagem; a identificação do rio a ser inventariado; a definição de locais candidatos; o levantamento de seções transversal e curvas cota \times área \times volume e dos reservatórios para diferentes alturas de queda; a regionalização das vazões com base na integração automática com o sistema HidroWeb (ANA) para a rede de postos fluviométricos instalada ao longo do rio.
- b) Adaptação do modelo de projetos de engenharia e geração de orçamentos dos projetos de usinas candidatas. Esse passo combina as informações do MDT com a engenharia por meio da aplicação automática do manual de inventário hidrelétrico e de bases de dados com custos unitários das obras civis e equipamentos eletromecânicos. Os custos socioambientais também são calculados nessa etapa a partir das interferências identificadas pelos projetos, por exemplo, relocação de populações, alagamento de estradas, supressão vegetal, APP, programas ambientais, entre outros.
- c) Formulação de um modelo de programação matemática para a seleção de projetos da lista de candidatos (um problema clássico da engenharia conhecido como “estudos de divisão de quedas”, como apresentado no Cap. 2) que maximize o benefício econômico da bacia hidrográfica considerando restrições ambientais. A resolução do problema original é inviável por sua complexidade (trata-se de um problema (i) inteiro por envolver decisões de construir/não construir os projetos; (ii) não linear por envolver relações não lineares, por exemplo, a produção de energia

(que envolve o produto de variáveis de decisão); (iii) estocástico, pois se o custo de implantação pode ser admitido como conhecido, os benefícios econômicos da decisão dependem de combinação de preços de energia e disponibilidade hídrica, cuja variabilidade precisa ser endereçada). Dessa forma, nesse trabalho, foram desenvolvidos métodos avançados para a resolução do problema.

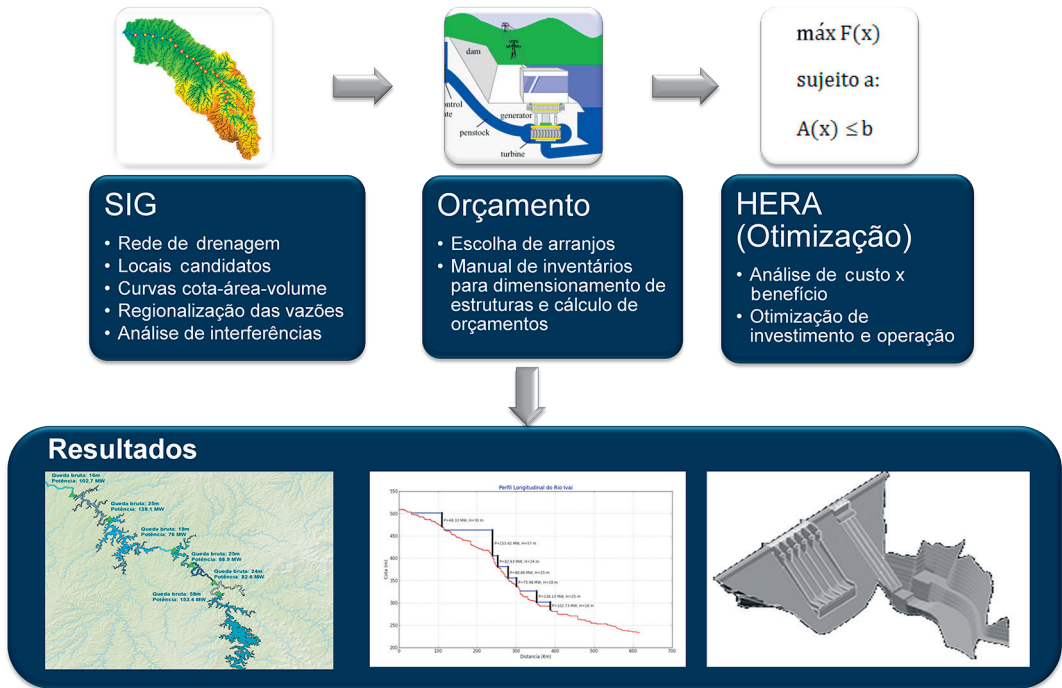


Fig. B.1 Componentes da ferramenta computacional

Nos próximos itens, cada um desses componentes será detalhado.

B.1 Geoprocessamento

Um módulo baseado em Sistema Geográfico de Informações (SIG) é responsável pelo processamento de dados de natureza geográfica, tais como topografia, rede de drenagem, cálculo de áreas e volumes de reservatórios etc. Os dados de entrada e procedimentos necessários para o processamento do terreno estão apresentados na Fig. B.2.

O processamento automático do MDE inclui a execução dos códigos para cálculo de direção de fluxo, acúmulo de fluxo e identificação da rede de drenagem. Uma vez que a água se move das regiões de maior elevação para as de menor elevação, um *raster* (imagens que contêm informações armazenadas em cada *pixel*) mostrando a direção de saída do fluxo de cada célula é produzido, conforme exemplificado na Fig. B.3.

O *raster* de acúmulo de fluxo representa o número de células que drenam para cada célula analisada. Com base nesse número, pode-se calcular a área de drenagem de cada célula, como demonstrado na Fig. B.4.

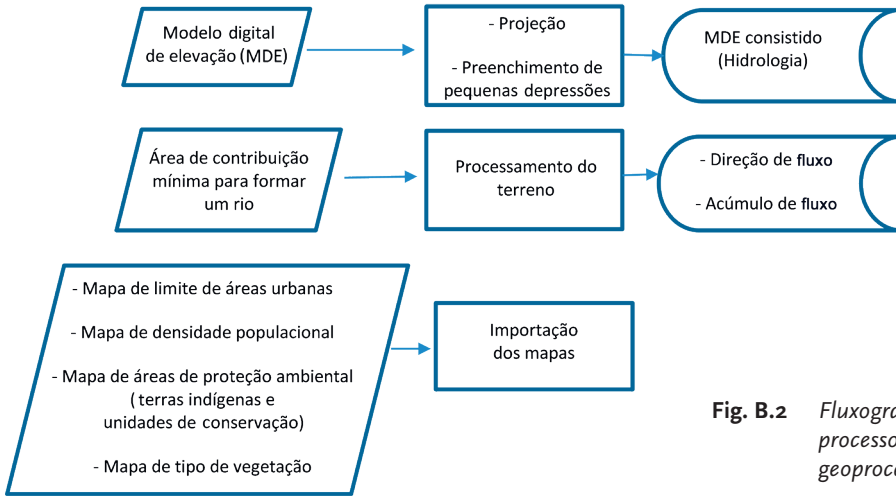


Fig. B.2 Fluxograma dos processos do módulo de geoprocessamento

Células com alto acúmulo de fluxo (várias células drenando para aquele ponto) são usadas para identificar a rede de drenagem, enquanto que células com acúmulo zero representam picos topográficos. Por meio da aplicação de um valor-limite para os resultados de acúmulo de fluxo, a rede de drenagem de uma região pode ser inferida (Fig. B.5). Por exemplo, se o usuário deseja que o valor mínimo de área de drenagem para gerar um rio seja 50 km², ele deverá inserir o valor 50 como limite ao iniciar o processamento do terreno.

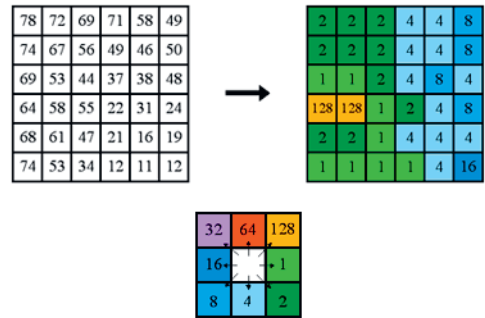


Fig. B.3 Transformação do dado de elevação (esquerda) em código de direção de fluxo (direita) e codificação utilizada para representar a direção de fluxo de cada célula

B.2 Hidrologia

O módulo de Hidrologia do Hera é responsável pelo cálculo de vazões afluentes aos reservatórios criados, utilizadas no cálculo de potência instalada, e pelo cálculo de vazões de cheia de projeto, necessárias para o dimensionamento de vertedouros e ensecadeiras. Após a identificação do segmento (trecho do rio) a ser estudado, a entrada de dados hidrológicos pode ser feita de forma manual, por meio da definição de uma estação fluviométrica e sua série de vazões médias mensais, ou de forma automática, pela importação dos dados das estações do HidroWeb (ANA, s.d.). A Fig. B.6 apresenta a localização das estações fluviométricas disponíveis no banco de dados HidroWeb.

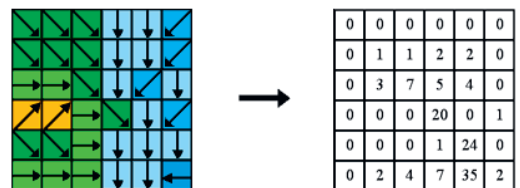


Fig. B.4 Direção de fluxo (esquerda) e acúmulo de fluxo (direita)

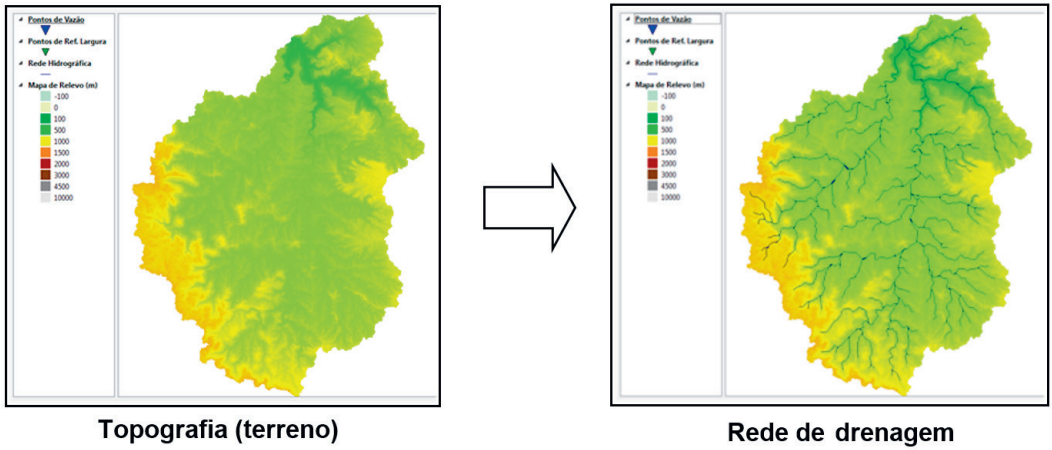


Fig. B.5 Extração automática da rede de drenagem de uma bacia

Recomenda-se que após a importação dos dados uma verificação da consistência da série seja realizada.

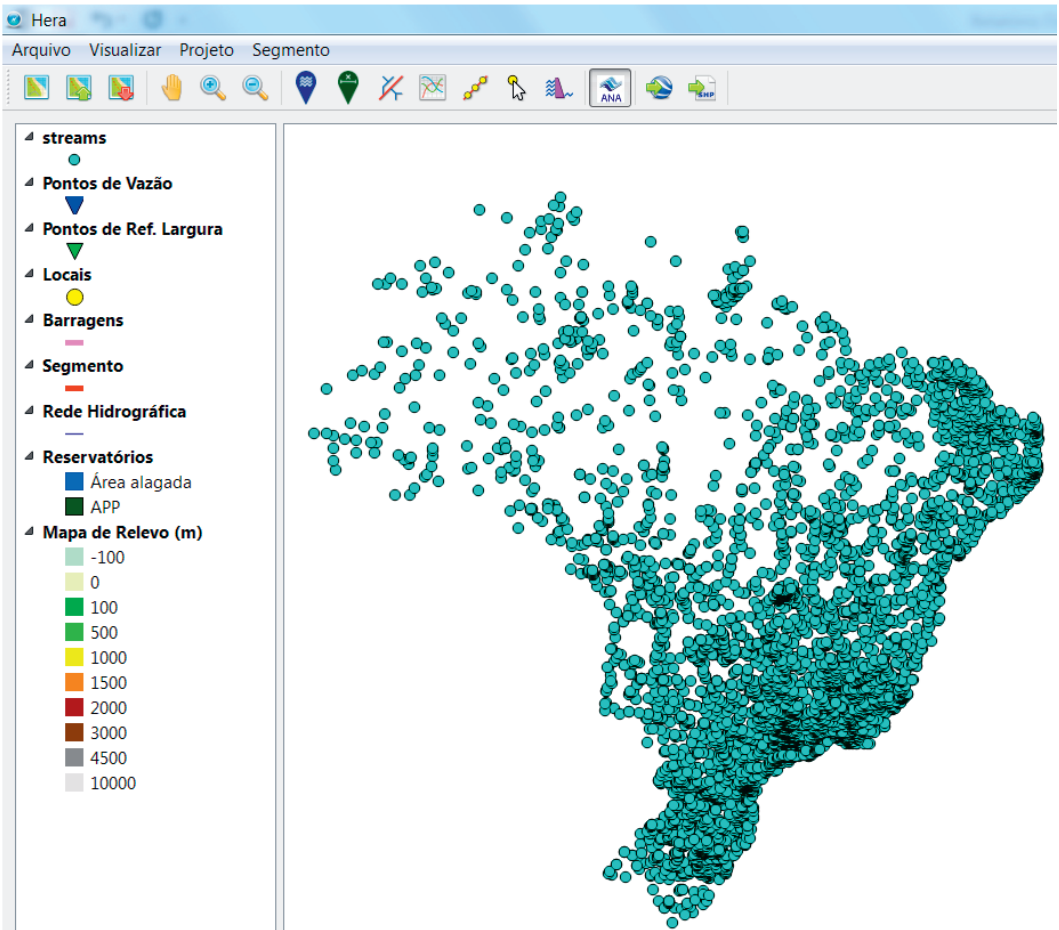


Fig. B.6 Localização das estações fluviométricas disponíveis no banco de dados HidroWeb

B.2.1 Regionalização de vazões e vazões extremas

Uma vez que a localização das estações fluviométricas difere dos locais das potenciais barragens, uma estimativa das séries de vazões afluentes para cada barramento é calculada usando uma relação entre áreas de drenagem. Já para as vazões extremas, a análise de frequência de cheias tem como objetivo estabelecer a relação entre os valores de vazões máximas e os tempos de retorno ou de recorrência a elas associados. Para a definição das cheias de projeto, o *Manual de inventário* da Eletrobras (MME, 2007) recomenda a utilização de duas distribuições: exponencial de dois parâmetros (estimada pelo método dos momentos), sempre que a assimetria da amostra for superior a 1,5, e Gumbel (extremos do tipo I), para assimetrias amostrais inferiores a 1,5 ambas codificadas no Hera.

B.3 Engenharia

O módulo de Engenharia visa usar informações hidrológicas e topográficas para gerar orçamentos para diversos arranjos de UHEs compatíveis com essas informações, selecionando-se a alternativa mais barata. A geração dos orçamentos ocorre em duas etapas:

- a) padrões de projeto (*templates*) são adaptados às condições hidrológicas e topográficas para a obtenção de dimensões e quantificação de volumes;
- b) geração de orçamento ocorre com base nos quantitativos calculados e na aplicação de metodologia de simulação da construção.

Na etapa (a), o dimensionamento segue a metodologia do *Manual de inventário* (MME, 2007) e o cálculo de volumes ocorre com a adequação das estruturas dimensionadas à topografia. Na etapa (b), os custos dos serviços são calculados por meio da simulação de variadas metodologias de construção para cada tipo de serviço e do uso de preços dos insumos dos serviços coletados periodicamente.

Foram realizados trabalhos correspondentes à incorporação de um conjunto de *templates* de projeto. Os *templates* definidos correspondem aos principais tipos de arranjo de Engenharia, contemplando tipos de desvio de rio (túneis, canais), tipos de barragem (terra, terra e enrocamento e concreto), tipos de casa de força, tipos de estruturas de dissipação (bacias e salto de esqui) e soluções de posicionamento da casa de força e vertedouro. Nas obras civis, a obtenção de dimensões básicas para estruturas foi gerada com base nas recomendações do *Manual de inventário* (MME, 2007), sendo gerada uma metodologia complementar em alguns casos, como nos arranjos de turbina bulbo.

O cálculo de orçamentos propriamente dito foi modificado de modo a permitir a geração de orçamentos completos de forma integrada ao dimensionamento de estruturas e cálculo de quantitativo de serviços. No que tange à elaboração de orçamentos, os trabalhos foram concentrados nas seguintes frentes:

- incorporação da possibilidade de se considerar automaticamente o reaproveitamento de materiais escavados para enrocamento, aterro, transições e produção de concreto;

- cálculo do custo de equipamentos eletromecânicos com metodologia do *Manual de inventário* (MME, 2007) e metodologia alternativa;
- cálculo de custos socioambientais.

Por fim, além do trabalho de desenvolvimento do módulo de Engenharia, foram feitos trabalhos de verificação e validação dos orçamentos e incorporados mecanismos para facilitar essa verificação e validação.

A seguir são detalhados os principais trabalhos realizados dentro do escopo do módulo de Engenharia.

B.3.1 Mecanismo de cálculo massivo de orçamentos

Desenvolveu-se uma estrutura de dados específica para representar as seções típicas das estruturas e o terreno. Isso permitiu uma redução importante do tempo de geração de cada orçamento, abrindo espaço para a investigação de múltiplas alternativas de arranjo para cada combinação de local e queda. Foi implementado um mecanismo para a especificação dos *templates* de forma mais abstrata, distinguindo-a do conceito de *layout*. Os *templates* especificam o tipo das estruturas e de solução e os *layouts* determinam o posicionamento das estruturas. Cada *template* tem um conjunto de *layouts* admissíveis e, para cada combinação de *template* e *layout*, um orçamento alternativo é gerado para a respectiva queda.

Um *template* especifica, por exemplo, que a turbina é do tipo Francis, a barragem é de concreto, o vertedouro é de salto de esqui e o desvio ocorre através de túnel. Um *layout* determina, por exemplo, que o vertedouro está no leito do rio com casa de força na ombreira esquerda.

O conjunto atual de alternativas que podem ser geradas combina um conjunto de 18 *templates* com 16 *layouts*, sendo que nem todos os *layouts* são aplicáveis para um certo *template*. Para cada queda em cada local, é selecionado somente o orçamento mais barato a ser utilizado na etapa que envolve a otimização da divisão de queda. Para tornar viável o dimensionamento e o cálculo de todos esses orçamentos, foram implementados mecanismos para:

- combinar especificações de *templates* com as de *layouts*, otimizando o dimensionamento;
- verificar a incompatibilidade em relação às condições topográficas para descarte de alternativas;
- não interromper a geração de orçamentos quando forem detectadas incompatibilidades de *layout* ou falta de dados que impedem a geração de algum orçamento específico;
- selecionar os dados que devem ser armazenados durante a geração de orçamentos, permitindo que sejam armazenados somente os custos finais selecionados para cada queda, em vez de todo o detalhamento de cada alternativa considerada.

Esse último mecanismo tornou-se necessário, porque, para cada orçamento, são elaborados resultados que permitem investigar todos os seus detalhes.

Com milhares de orçamentos sendo gerados e com a gravação de todos os resultados, a base de dados tende a crescer a taxas de múltiplos GB de dados em cada execução. Os orçamentos passaram a ser classificados em *selecionados*, *descartados* ou *inválidos*.

Os orçamentos *selecionados* são os mais baratos para certa queda e local; os orçamentos *descartados* correspondem a alternativas que ficaram mais caras; e os *inválidos*, a alternativas para as quais se tenha verificado incompatibilidades com as condições de topografia e hidrologia ou para as quais algum custo não tenha podido ser calculado (por exemplo, em razão de limitações na metodologia de cálculo de custos de equipamentos eletromecânicos).

Foram implementados mecanismos para armazenar os desenhos das estruturas em formato próprio e para a importação e apresentação dessas estruturas em ambiente CAD quando necessário. De modo a permitir a paralelização na geração de orçamentos, foi criado também mecanismo que permite o acionamento da geração de orçamentos para um local sem que a interface do módulo de Engenharia precise ser aberta. Com isso, múltiplas instâncias do módulo podem ser abertas em várias máquinas. A interface principal do Hera controla o processo e é responsável por coletar os resultados e apresentá-los aos usuários, acionando a otimização da divisão de quedas com base nos custos calculados.

B.3.2 Consolidação do conjunto de *templates* e *layouts*

O trabalho de definição do conjunto de *templates* e *layouts* se iniciou com base nos casos em que as turbinas eram do tipo Francis ou Kaplan. Anteriormente, havia sido desenvolvido um único *template* para turbina bulbo com posicionamento fixo. O *template* antigo foi ajustado de acordo com o novo mecanismo de *templates* e *layouts*, permitindo-se o estudo de diferentes alternativas também para quedas baixas.

O conjunto de *templates* incorporado ao sistema permite a geração de orçamentos para as seguintes alternativas de turbinas (Bulbo, Kaplan, Francis e Pelton), diversos tipos de barragem (concreto, concreto compactado a rolo - CCR, de terra ou terra com enrocamento), vertedouros (bacia de dissipação e salto de esqui) e esquemas de desvio de rio. O conjunto de alternativas consideradas para cada caso não exaure todas as possibilidades, mas permite uma investigação estendida de como o custo pode variar em função dos *templates* e *layouts* definidos.

B.3.3 Reaproveitamento de rocha e solo escavados

Foi implementado mecanismo para considerar automaticamente o reaproveitamento de materiais escavados (solo ou rocha). Consegue-se, com isso, levar em conta a utilização direta de material produzido durante a obra, o eventual estoque de material para utilização posterior e a eventual necessidade de realmente levar material para bota-fora e de escavar em pedreira e área de empréstimo. O mecanismo leva em conta o cronograma da obra e taxas de reaproveitamento que podem ser configuradas para cada *template*.

B.3.4 Equipamento eletromecânicos

No caso dos equipamentos eletromecânicos, foi utilizada a metodologia de cálculo de custos do *Manual de inventário* (MME, 2007). Tal metodologia, baseada em curvas obtidas com base em custos de aproveitamentos anteriores, é incompleta em algumas situações. Em razão disso, contatou-se a EPE, que forneceu documento com metodologia alternativa para o cálculo de custo de vários equipamentos. Essa nova metodologia apoia-se no conceito do cálculo de um Valor Novo de Reposição de usinas ao final do período de depreciação.

O módulo de Engenharia passou a dispor das duas metodologias para o cálculo do custo de equipamentos eletromecânicos e tornou possível combiná-las. Com isso, o conjunto de orçamentos que não podiam ter orçamentos completos calculados por falta de valores para equipamentos eletromecânicos diminuiu consideravelmente. Nesse módulo de Engenharia, ofereceram-se as opções de usar a metodologia do *Manual de inventário* (MME, 2007) ou a nova metodologia fornecida pela EPE e de complementar ou não os custos com essa metodologia ou com base em novas curvas de custos obtidas de fabricantes.

Em relação aos equipamentos eletromecânicos, cabe ressaltar que eles têm custo calculado para a data prevista no *Manual de inventário* (MME, 2007). Os valores são então trazidos para a data de referência do orçamento, aquela para a qual obras civis são orçadas de acordo com preços de insumos com preços coletados. A atualização ocorre por meio de critério de atualização escolhido pelo usuário. O critério pode corresponder ao uso de um único índice ou de índices específicos para itens de custo diferentes.

B.3.5 Custos socioambientais

A seleção dos fatores de impactos socioambientais foi feita com base nos estudos de inventário aprovados, preparados conforme o *Manual de inventário* da Eletrobras (MME, 2007).

Foi criado mecanismo para permitir a complementação do orçamento com os custos socioambientais (conhecidos como “Conta 10” no Orçamento Padrão Eletrobras) (Fig. B.7). São definidos custos unitários para diversos itens. Os quantitativos a serem multiplicados por esses custos unitários são calculados e fornecidos ao módulo de Engenharia.

Os itens de custo socioambiental calculados são os seguintes: i) relocação de rodovias pavimentadas (km); ii) relocação de rodovias não pavimentadas (km); iii) relocação de ferrovias (km); iv) aquisição de propriedades urbanas (km²); v) aquisição de propriedades rurais (km²); vi) relocação de famílias urbanas (un.); vii) relocação de famílias rurais (un.); viii) limpeza de reservatório (km²); ix) proteção – reserva ambiental (km²); x) proteção – reserva indígena (km²); xi) supressão de vegetação (km²). Os mapas temáticos importados pela ferramenta computacional para cálculo dos custos socioambientais são: i) censo demográfico; ii) limites urbanos; iii) vegetação; iv) áreas de reserva ambiental e indígenas; v) rodovias e ferrovias.

Em geral, as ações relacionadas representam 70% do valor total da Conta 10 e, por isso, foram selecionadas como fatores restritivos à construção dos reservatórios. Monitoramentos e outros programas ambientais representam

os outros 30% do total orçado e foram considerados como um custo indireto. Os mapas de estradas e rodovias, grandes assentamentos, cidades e áreas de preservação ambiental (terras indígenas e/ou unidades de conservação) devem ser fornecidos em formato *shapefile* (shp), que armazena dados geoespaciais em forma de vetores, na mesma projeção geográfica em que o MDE foi fornecido. Casos mais críticos como afetação de áreas indígenas ou de unidades de conservação foram considerados como restritivos à implantação dos reservatórios.

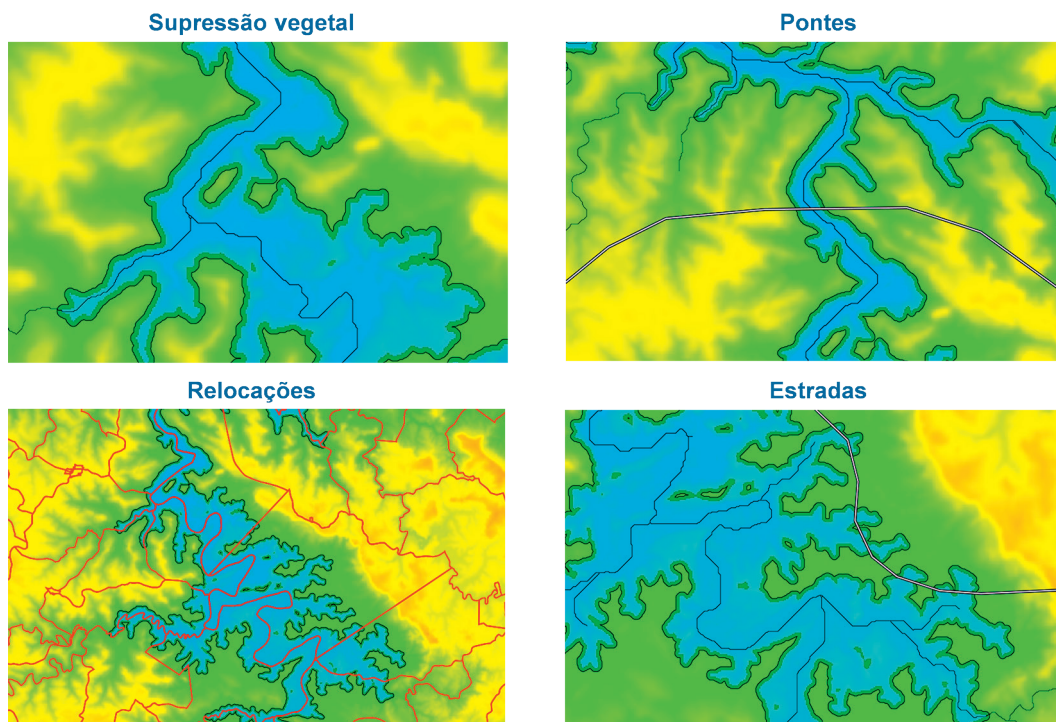


Fig. B.7 Componentes da Conta 10

B.4 Sistema computacional

O sistema Hera apresenta uma interface gráfica por meio da qual todas as suas funcionalidades podem ser acessadas. Essa interface é responsável pela recepção e checagem dos dados de entrada e por coordenar as atividades dos demais módulos (SIG, engenharia/orçamento e otimizador). O processamento de dados do sistema Hera é composto das seguintes fases:

- a) criação do projeto e processamento topográfico;
- b) importação de dados históricos de vazão e geográficos regionais;
- c) definição do segmento e dos locais de estudo;
- d) processamento dos locais (GIS + engenharia);
- e) otimização de inventário;
- f) exportação e visualização de resultados.

B.4.1 Definição dos locais de estudo

Para se definir os locais de estudo, deve-se primeiro determinar o segmento de estudo. Um local de estudo é um ponto do segmento de estudo escolhido para a simulação da construção de usinas hidrelétricas. Tais locais podem ser escolhidos de forma manual ou por meio de um algoritmo de distribuição de pontos (Fig. B.8). Esse algoritmo pode distribuir qualquer número de pontos ao longo do segmento de estudo em intervalos iguais de diferença de altitude, gerando um conjunto de pontos igualmente espaçados na vertical. As ferramentas de *geração de distribuição de locais* e *manipulação de locais* devem ser utilizadas para tal.

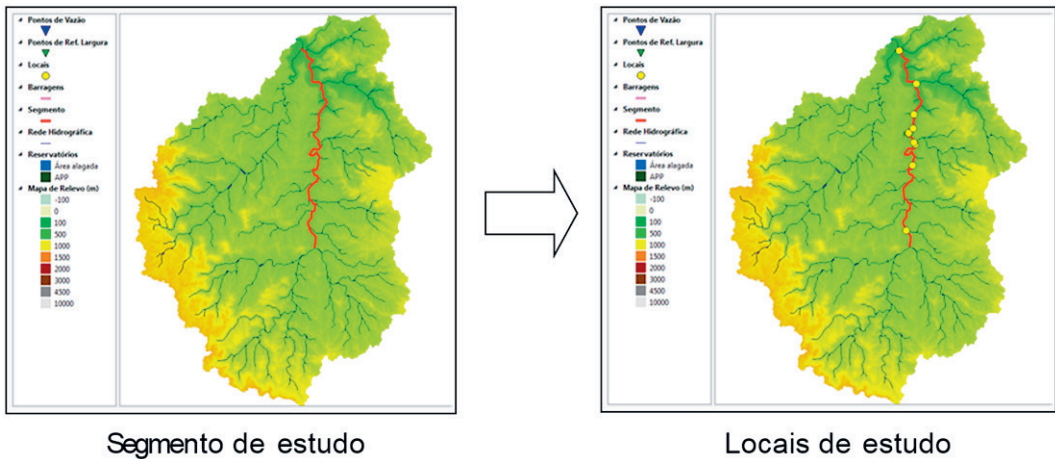


Fig. B.8 Definição dos locais de estudo

B.4.2 Processamento dos locais

Este passo representa o ponto central do sistema Hera. Ele é responsável por simular a construção de usinas hidrelétricas nos locais de estudo. O primeiro passo é o processamento GIS, utilizado para encontrar as ombreiras das barragens e delimitar a área a ser alagada. O algoritmo para se projetar uma barragem com seu reservatório é baseado em curvas de nível. Inicialmente são traçadas todas as curvas de nível com altitude igual à cota das ombreiras. Em seguida, são testados diversos ângulos para a barragem, tal como ilustrado na Fig. B.9.

O algoritmo escolhe o ângulo que minimiza a distância entre as ombreiras (ilustrado em roxo na Fig. B.9). Em seguida, o algoritmo traça o reservatório combinando a geometria da barragem com a curva de nível, resultando no polígono do reservatório. O próximo passo é adicionar as ilhas formadas pelo reservatório, que são determinadas por todas as curvas de nível fechadas no interior do reservatório. Finalmente, calcula-se a área de proteção permanente (APP), traçando-se um *buffer* de 100 m ao redor do polígono do reservatório. Todos esses valores são calculados com operações topológicas de interseção entre polígonos e entre polígonos e linhas (para o caso das vias). O último passo consiste em definir qual é o modelo de engenharia mais apropriado para o local e implantá-lo, calculando os volumes das principais estruturas. Esse cálculo

é de responsabilidade do módulo de engenharia. Ao final do processamento, tem-se um esboço de um projeto com uma estimativa dos custos e da potência a ser gerada no local. Para cada local, podem ser gerados diversos projetos relativos a alturas de queda diferentes.

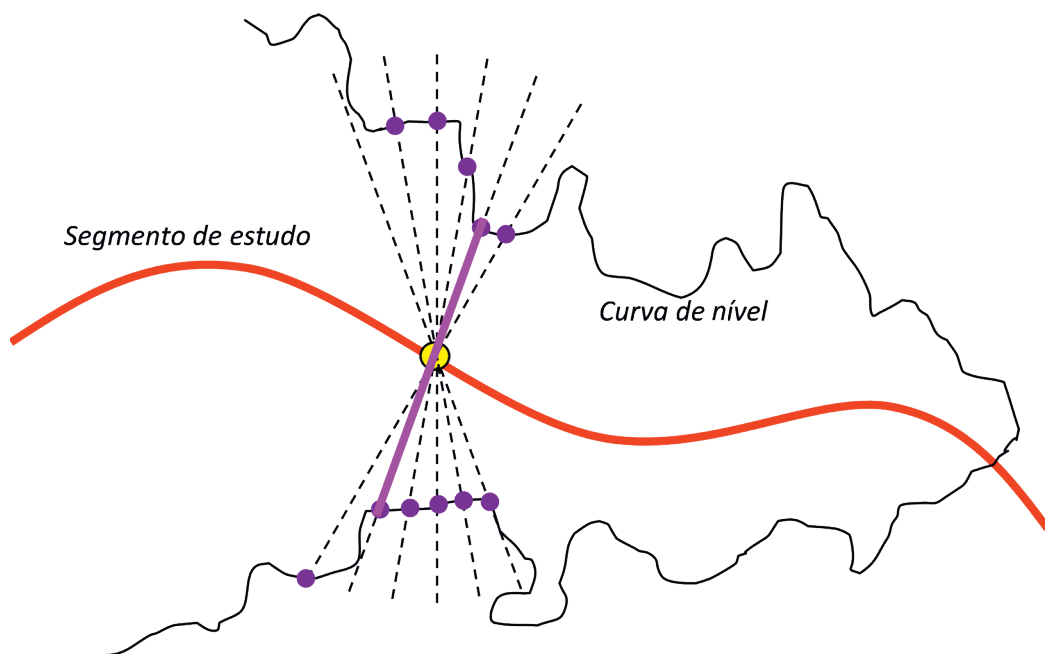


Fig. B.9 Alternativas para definição do eixo da barragem no local candidato

Otimização de inventário

O último passo de processamento no sistema Hera consiste em um algoritmo de otimização. Esse algoritmo considera todos os projetos hidrelétricos simulados ao longo do segmento de estudo e seleciona um subconjunto que otimiza o aproveitamento total do rio no trecho estudado. O algoritmo é acionado pelo comando *Otimização de inventário*.

B.5 Otimização

B.5.1 Características

O módulo otimizador busca solucionar o problema da seleção de investimentos em usinas hidrelétricas em um rio a fim de maximizar a receita proveniente de sua operação. Para tal, esse módulo se vale de um modelo matemático não linear inteiro estocástico. Esse problema é não linear (e não convexo), pois a geração da energia depende de um produto de variáveis que são a altura de queda e a vazão de turbinamento. Em Faria (2011), encontra-se uma formulação para pequenas centrais hidrelétricas a fio d'água (sem variação de níveis). O problema é inteiro, pois as decisões de investimento são representadas por variáveis binárias. Por fim, ele é estocástico, pois as vazões afluentes ao longo do rio são representadas por variáveis aleatórias discretas.

Esse fato torna o problema do programa Hera particularmente difícil de ser solucionado, especialmente para casos grandes, com dezenas de locais e alturas de barragem disponíveis. O otimizador, portanto, possui diversas opções de formulação para tornar o problema mais tratável a fim de garantir uma solução para este.

As duas principais opções para solucionar o problema são uma formulação determinística e outra estocástica. Esta leva em consideração a incerteza das afluências naturais nos diversos pontos do rio. Utiliza-se um modelo estocástico, pois ele representa melhor a operação das usinas hidrelétricas, que precisa ser, de certa forma, robusta frente à imprevisibilidade das afluências ao longo do rio. Assim, um modelo estocástico está mais próximo da realidade operativa do sistema hídrico do que um modelo determinístico.

Dentro de cada opção, ainda há a customização em diversas abordagens de modelagem que visam transformar o problema não linear e não convexo em um problema linear e resolvido por pacote de otimização (*solver*) comercial (Fico..., 2009). Tais métodos são: envelopes de McCormick, envelopes de McCormick por segmentos de níveis de reservatórios e uma heurística especial que combina os dois métodos anteriores que busca reduzir o tempo de solução. No próximo item, serão apresentadas em detalhe as diferentes opções disponíveis no otimizador. Em seguida, serão exibidas as formulações dos modelos matemáticos determinísticos e estocásticos.

B.5.2 Opções de abordagem pelo otimizador

O otimizador apresenta duas opções (ou versões) principais. A primeira versão é uma versão determinística do problema. A segunda é uma formulação estocástica, na qual a afluência é tratada como uma variável aleatória discreta, por meio de cenários dispostos em uma estrutura de árvore multirramificada.

A abordagem determinística busca o portfólio ótimo de usinas que maximize a receita proveniente da operação ao longo do horizonte de tempo considerado. A abordagem estocástica se baseia no conceito de árvores multirramificadas e em classificadores de cenários. Basicamente, uma árvore multirramificada é semelhante a uma árvore de cenários clássica, porém, a cada nó é atribuído um conjunto de realizações da variável aleatória em questão e não somente um único valor. Um classificador de cenários é um método de atribuição de cenários aos nós de uma árvore de cenários. Atualmente o otimizador utiliza um classificador denominado Normal, por meio do qual os cenários são classificados de acordo com as suas respectivas afluências anuais e dispostos na árvore em ordem decrescente de afluências. A opção estocástica também faz algumas alterações na estrutura do problema em relação à abordagem determinística:

- a) o horizonte de tempo passa a ser fixo em dois anos;
- b) os cenários gerados são de dois anos consecutivos, obtidos por meio da série disponível de afluências;
- c) a estrutura da árvore é fixa com aberturas nos meses 1, 3, 6, 9 e 12 da árvore;

d) a estrutura da árvore é reiniciada a cada ano. Isso quer dizer que após o fim de cada ano a árvore volta para a configuração inicial (com dois nós). Dessa maneira, evita-se a explosão exponencial do número de nós. A estrutura da árvore ao longo do horizonte de dois anos está esquematizada na Fig. B.10.

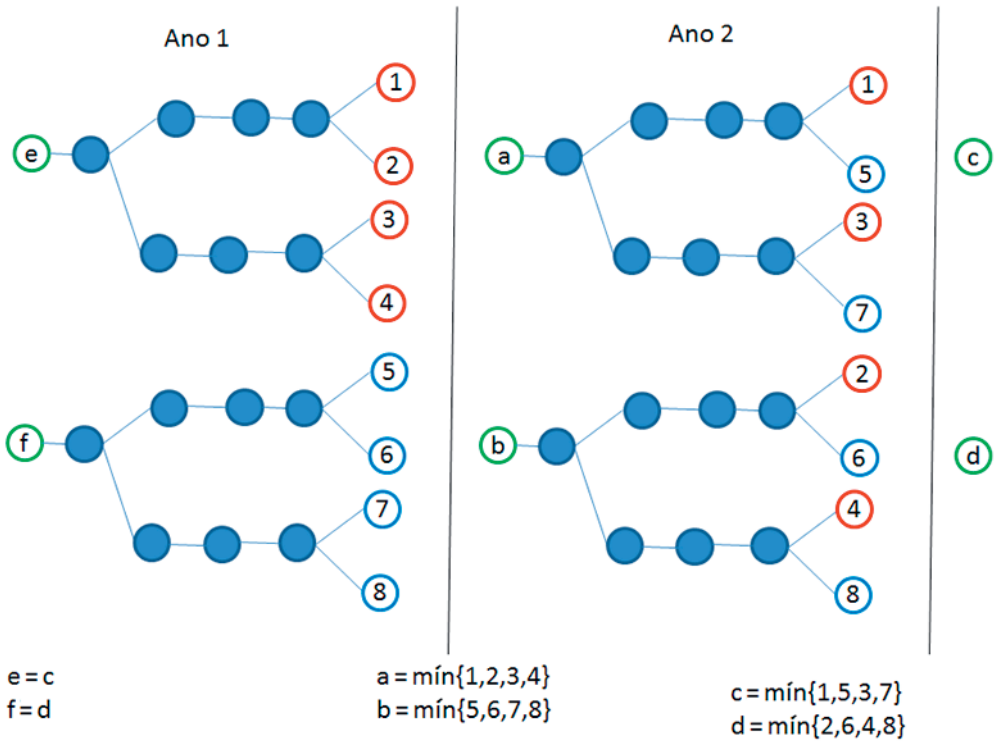


Fig. B.10 Esquema estrutura da árvore ao longo do horizonte temporal

A lógica por trás do esquema da Fig. B.10 é a seguinte: para o primeiro ano, classificam-se os cenários nos nós da árvore de acordo com o método Normal descrito anteriormente. Com isso, há dois subgrupos de cenários, que são representados pelos nós com bordas vermelhas (1-4) e bordas azuis (7-8). De cada subgrupo escolhe-se o cenário que possui a menor afluência anual. O volume final associado à média dos cenários contidos no nó que possui o cenário de afluência mínima é passado para os nós iniciais do ano 2 (nós *a* e *b*). Para o ano seguinte, os cenários são reclassificados na árvore de acordo com suas afluências anuais para o ano 2. Repete-se o processo para a obtenção dos volumes referentes aos nós *c* e *d*. Por fim, faz-se com que o volume dos nós *e* e *f* sejam iguais aos volumes dos nós *c* e *d*, respectivamente. Com isso, obtém-se uma situação de *steady-state* para a operação, uma vez que os volumes finais da árvore são iguais aos volumes iniciais. Esse fato é interessante, pois ele representa uma operação contínua das usinas no rio, o que é desejável uma vez que o potencial de exploração do rio não termina ao final do horizonte de planejamento.

Para a utilização de uma abordagem estocástica, é necessária a adição de restrições de *não antecipatividade* que incorporem a dependência temporal entre os nós na modelagem. No otimizador, essas restrições são abordadas de uma forma especial: no final de cada mês, o volume inicial dos reservatórios em cada cenário dos nós filhos é igual à média do volume final dos reservatórios em cada cenário do nó pai.

Dentro de cada abordagem, o otimizador ainda possui a customização em diversas abordagens de modelagem que visam transformar o problema não linear e não convexo em um problema linear. Tais métodos são: envelopes de McCormick, envelopes de McCormick por segmentos de níveis de reservatórios e uma heurística especial que combina os dois métodos anteriores.

A seguir, são descritos os métodos utilizados no modelo para lidar com a não linearidade e não convexidade do problema.

1) *Modelo com envelopes de McCormick para os reservatórios*

A geração de energia é uma função não linear e não convexa do turbinamento e da altura de queda. Portanto, esse método busca convexificar e linearizar a região viável a fim de se obter uma boa aproximação para o problema. A Fig. B.11 mostra como a região viável é transformada por esse método.

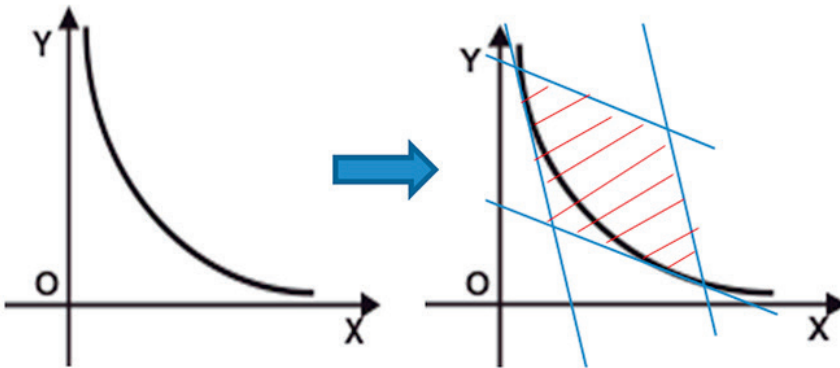


Fig. B.11 Esquema dos envelopes de McCormick

A curva em preto representa a região viável original do problema. A região vermelha hachurada representa a nova região viável, através dos envelopes de McCormick. Note que a segunda é uma relaxação da primeira, ou seja, ela abrange mais pontos (x, y) que podem vir a ser solução para o problema, sem eliminar nenhum ponto da região original.

2) *Modelo com envelopes de McCormick por segmentos de níveis dos reservatórios*

Esse método busca apertar os envelopes de McCormick, ou seja, ele busca diminuir a relaxação linear para aproximar a solução encontrada da solução real para o problema. Para tal, a região viável é dividida em diversos segmentos (no caso, em diversas faixas de alturas), e os envelopes são definidos em cada segmento (Fig. B.12).

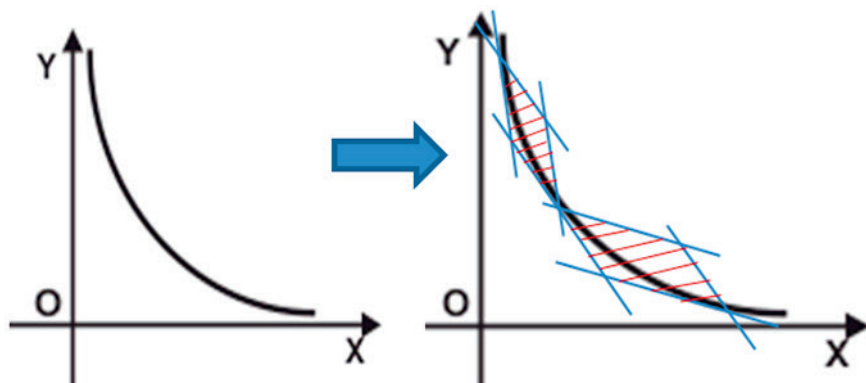


Fig. B.12 Esquema dos envelopes de McCormick por segmento

Note que a relaxação linear é mais apertada do que a anterior, ou seja, menos pontos possíveis para solução são incluídos pela relaxação. Entretanto, para realizar esse processo é necessário criar variáveis binárias adicionais para controlar a representação de cada segmento. No nosso caso, essas variáveis controlam o preenchimento de cada segmento dos reservatórios: um segmento superior só pode ser preenchido caso um segmento inferior esteja totalmente cheio. Essas variáveis inteiras afetam o tempo de solução, tornando o problema grande e fazendo com que convergência até o ponto ótimo seja lenta.

3) Heurística

A heurística tem por objetivo reduzir o tempo de solução do método 2. Ela se baseia na premissa de que as decisões do investimento não são alteradas caso nós removêssemos todas as variáveis e restrições inteiras ligadas ao controle no preenchimento dos volumes. Portanto, a heurística executa o seguinte procedimento:

- i) roda o modelo com os envelopes de McCormick com os segmentos, porém, sem as variáveis binárias que controlam o preenchimento de cada segmento;
- ii) fixa a solução de investimento;
- iii) roda o modelo com investimento fixo com os envelopes de McCormick com os segmentos e com as variáveis binárias que controlam o preenchimento de cada segmento.

Dessa maneira, a etapa i da heurística se encarrega de decidir quais investimentos serão feitos, enquanto que a etapa iii se encarrega de dar um ajuste fino na operação dos reservatórios de modo a obter uma solução mais próxima da operação real do sistema.

B.5.3 Formulação do problema e métodos de solução

O leitor interessado encontrará detalhes da formulação do problema e dos

métodos de solução empregados no *Relatório final do projeto de P&D – PSR/EDF UTE Norte Fluminense* (s.d.).

B.5.4 Resultados computacionais

Com o intuito de fornecer um exemplo do funcionamento do algoritmo apresentado anteriormente, serão apresentados aqui os resultados de um caso no qual foram avaliados 34 possíveis locais de investimento para os quais os métodos tradicionais de solução não são capazes de fornecer uma solução em um tempo razoável. Para o caso com 34 locais candidatos, tanto o método tradicional de solução quanto a heurística não foram capazes de fornecer soluções satisfatórias, pois o *gap* de convergência ficou acima de 100% e o programa abortou por excesso de uso de memória. O algoritmo proposto foi capaz de achar uma solução com *gap* de 17% após 11 interações.

B.5.5 Processamento distribuído

O desenvolvimento contemplou a utilização de processamento distribuído como forma de tornar tolerável o tempo de execução das tarefas de geoprocessamento, engenharia (orçamentos) e otimização. O processamento distribuído aproveita o esforço de computadores – e seus múltiplos processadores – trabalhando em paralelo para redução do tempo de execução de casos de estudo do Hera.

O PSR Cloud é uma plataforma da PSR concebida inicialmente para gerenciar a execução remota de modelos de simulação de despacho hidrotérmico em um ambiente de processamento distribuído em nuvem (*cloud computing*), de maneira que os usuários não precisam possuir nenhuma infraestrutura necessária para atingir o mesmo objetivo. Essa plataforma foi utilizada também no projeto Hera.

B.6 Visualização

Este módulo foi incorporado ao Sistema de Informação no ano de 2014 e tem como objetivo fornecer ao usuário do sistema um modelo vetorial CAD (AutoCAD) para a visualização e certificação dos arranjos desenvolvidos com base no Módulo de dimensionamento das estruturas dos projetos de usina hidrelétrica.

B.6.1 Modelagem

Inicialmente foram desenvolvidos modelos tridimensionais para as estruturas utilizando a ferramenta Solid Modeling do AutoCAD. Por meio desses modelos, é possível extrair volumes e realizar a verificação visual da estrutura. Os modelos em Solid se mostraram muito eficientes para trabalhar com as estruturas lineares, que não acompanham um perfil de rocha ou de solo (terreno natural). Para as estruturas não lineares, é difícil trabalhar com o Solid, pois ele apresenta muitos *bugs* durante o processo de modelagem, logo, para essas estruturas, recorrem-se, então, aos *subassemblies* (seção tipo), uma ferramenta do Civil3D dinâmica e com a opção de impute de dados por meio de um operador.

Os *subassemblies* estão sendo modelados tendo como premissa o Anexo H (Figuras dos estudos finais) e o Anexo C (Planilhas de dimensionamento e quantificação) do *Manual de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas* (MME, 2007).

Os *subassemblies* modelam de forma ser “inteligente” as estruturas, permitindo adaptações a diferentes situações e parâmetros, retornando para o operador um arranjo em 3D e cálculo de volumes das estruturas e escavações. Os *subassemblies* têm como base a API do Civil3D e são desenvolvidos em VB.NET. A Fig. B.13 ilustra um resultado de um arranjo testado.

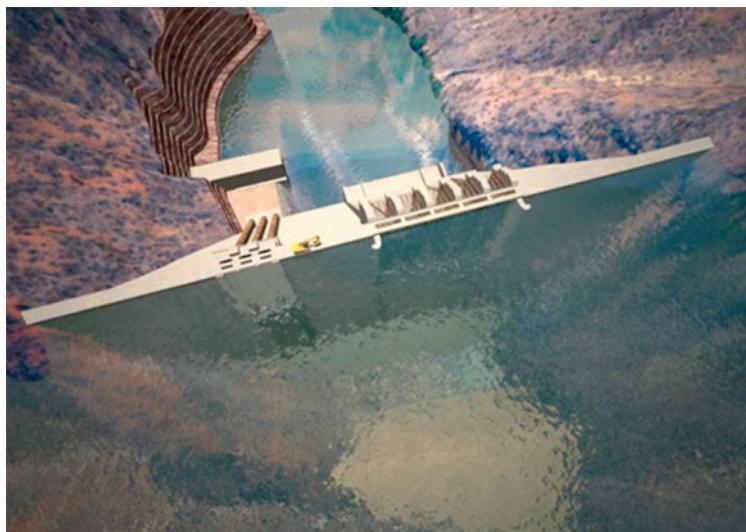


Fig. B.13 *Arranjo de usina em CAD 3D*

B.7 Estudo de caso

Ilustra-se a aplicação da ferramenta com base na avaliação do potencial do rio Ivaí, que nasce no município de Prudentópolis, na região centro-sul do Estado do Paraná. Seus principais formadores são o rio dos Patos e rio São João. Possui 685 km de extensão e percorre diversos municípios do estado do Paraná até sua foz, em um braço do rio Paraná. Sua bacia hidrográfica possui 36.540 km², e sua vazão média nas proximidades da foz é da ordem de 689 m³/s.

O Modelo Digital de Elevação foi obtido do banco de dados Topodata/Inpe (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>), com resolução de 30 m × 30 m. Primeiramente, foi feito o mosaico das imagens do MDE, que depois foi projetado para UTM zona 22 S, Datum WGS 84. Após o mosaico e projeção, a ferramenta de preenchimento de depressões foi aplicada para gerar um MDE hidrologicamente consistido. Finalmente, o MDE foi exportado para formato TIF, para que pudesse ser lido pelo HERA. Essas etapas foram realizadas no software ArcGis 10.2. Após a criação do novo projeto no Hera, o terreno foi processado e a rede de drenagem foi gerada considerando uma área mínima de 5 km² (Paz; Collischonn, 2008). Depois de identificar o segmento desejado, foram importadas cinco estações fluviométricas do banco de dados HidroWeb/ANA. As larguras médias das seções transversais em cada estação fluviométrica também foram informadas.

A ferramenta de distribuição automática de locais foi utilizada para gerar 50 locais igualmente espaçados pela altura vertical ao longo do segmento selecionado. A opção de geração automática de hidrelétricas foi utilizada para construir

cinco alturas de quedas, de 20 m até 60 m, com incremento de 10 m em cada um dos locais identificados como barramentos. A largura máxima da barragem foi estabelecida em 2.000 m, e o fator de capacidade foi definido em 0,55. O processo de construção dos reservatórios foi executado em 4 horas e 13 minutos. Foram projetadas 92 alturas de quedas, em 43 locais. 158 alturas de quedas foram inviáveis. A otimização foi executada em 30 minutos. A alternativa de quedas selecionada é composta por quatro usinas, conforme apresentado na Tab. B.1.

Tab. B.1 Alternativa de quedas

| ID do local | Altura de queda (m) | Potência (MW) | Área do reservatório (km ²) | Volume do reservatório (hm ³) | Custo (MM R\$) | Custo (R\$/kW) |
|--------------|---------------------|---------------|---|---|-----------------|-----------------|
| 37 | 54 | 147,06 | 126,58 | 1.737,35 | 1.052,02 | 7.153,68 |
| 41 | 40 | 144,90 | 28,63 | 400,90 | 807,04 | 5.569,63 |
| 44 | 30 | 124,76 | 40,46 | 322,30 | 739,17 | 5.924,74 |
| 48 | 20 | 121,55 | 44,87 | 295,50 | 757,34 | 6.230,69 |
| Total | 144 | 538,27 | 240,54 | 2.756,05 | 3.355,57 | 6.233,99 |

A Fig. B.14 mostra os mapas que permitem avaliar os impactos e custos ambientais associados.

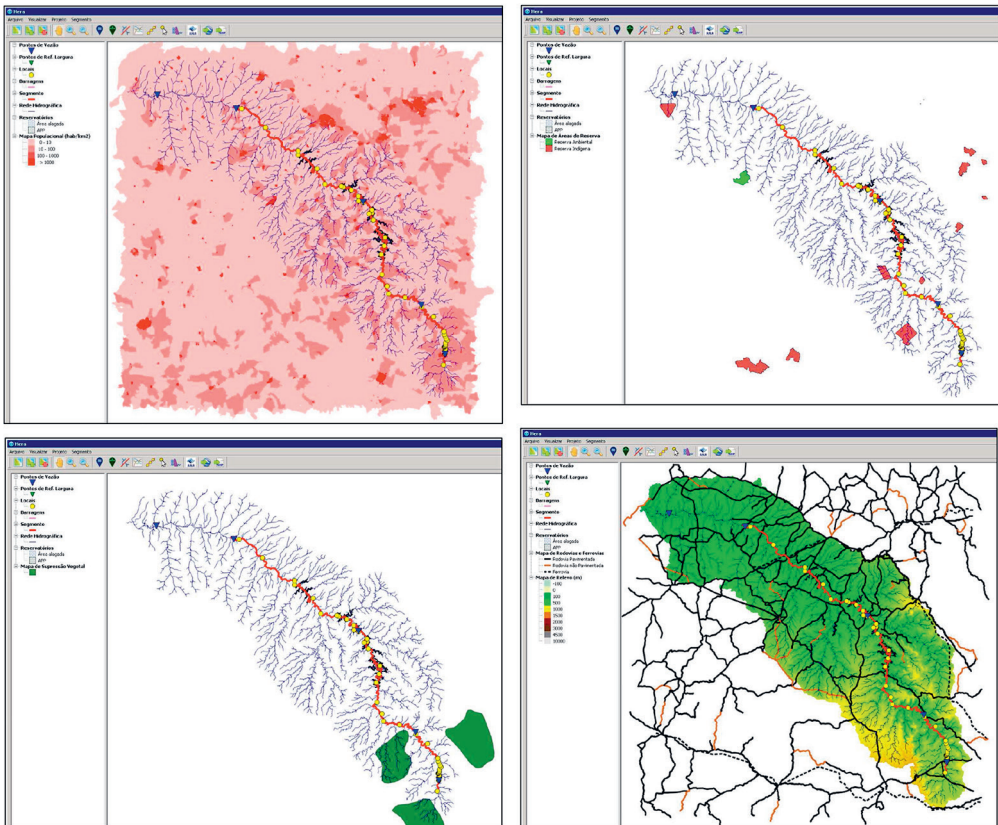


Fig. B.14 Mapas temáticos utilizados na Conta 10: densidade populacional, áreas de proteção ambiental, áreas passíveis de supressão vegetal e viário utilizados no estudo do Ivaí

A alternativa de divisão de quedas selecionada foi exportada para formato KML e pode ser visualizada nas Figs. B.15 e B.16.



Fig. B.15 Alternativa de divisão de quedas selecionada: (A) 122 MW, 20 m, 45 km²; (B) 125 MW, 30 m, 40 km²; (C) 145 MW, 40 m, 29 km²; (D) 147 MW, 54 m, 126 km²
 Fonte: Google e Landsat (2014).

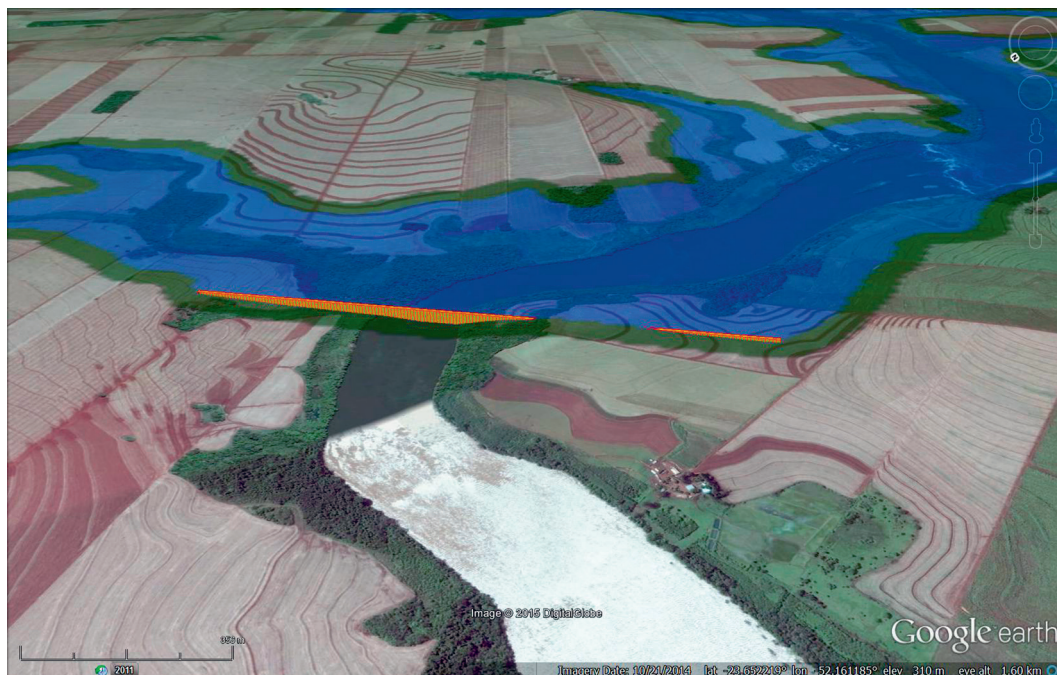


Fig. B.16 Vista da barragem de 122 MW (ID 48)
 Fonte: Google e DigitalGlobe (2014).

B.8 Conclusões

Um modelo computacional para a determinação do potencial hidrelétrico foi desenvolvido no âmbito desse projeto de P&D. O modelo investiga alternativas de divisão de queda por meio de indicadores técnico-econômicos (custo de produção de energia) e impactos socioambientais, de forma análoga ao *Manual de inventário hidrelétrico* da Eletrobras (MME, 2007). Oferece, ainda, um ambiente racional para comparação de alternativas e quantificação dos impactos econômicos de restrições, como a virtual impossibilidade de construção de reservatórios de regularização.

O produto dessa P&D poderá ser utilizado como ambiente de avaliação de alternativas de divisão de quedas, contribuindo, assim, para aumentar a racionalidade sobre o desenvolvimento de usinas hidrelétricas no Brasil. Uma aplicação importante é a avaliação da perda econômica acarretada pela virtual proibição de construção de reservatórios com capacidade de regularização.

Referências bibliográficas

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *HidroWeb*: sistema de informações hidrológicas. [s.l.], [s.d.].
- FARIA, L. F. T. *Otimização de estudos de inventário hidroelétricos*. 2011. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- FICO™ XPRESS OPTIMIZATION SUITE. *Xpress-Mosel Reference Manual*, 2009.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Manual de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas*. Brasília, DF, 2007.
- RELATÓRIO final do projeto de P&D – PSR/EdF UTE Norte Fluminense. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.psr-inc.com.br/>>.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. *Revista Geográfica Acadêmica*, v. 2, p. 84–95, 2008.

Bibliografia complementar

- AHMED, S. A scenario decomposition algorithm for 0-1 stochastic programs. *Operations Research Letters*, v. 41, n. 6, p. 565-569, Nov. 2013.
- FARR, T. G. et al. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.*, v. 43, RG2004, 2007.
- LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, v. 28, n. 3, p. 497-520, 1960.
- LANDAU, E. C.; GUIMARÃES, D. P. Análise comparativa entre os modelos digitais de elevação ASTER, SRTM e TOPODATA. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. *Anais*. Curitiba: INPE, 2011. p. 4003-4010. Disponível em: <marte.dpi.inpe.br>.
- MARQUES, H. G.; PENATTI, N. C.; PARANHOS FILHO, A. C.; FROEHLICH, O.; ALMEIDA, T. I. R.; SHIMABUKURO, Y. Comparação entre os modelos de elevação SRTM, TOPODATA e ASTER na delimitação automática de rede de drenagem e limite de bacia hidrográfica. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. *Anais*. Curitiba: INPE, 2011. p. 1271–1278. Disponível em: <marte.dpi.inpe.br>.

- MCCORMICK, G. P. Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I – Convex underestimating problems. *Mathematical Programming*, v. 10, p. 147-175, 1976.
- MORISSON VALERIANO, M.; FÁTIMA ROSSETTI, D.; ALBUQUERQUE, P. C. G. TOPODATA: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal. *Anais. Natal: INPE*, 2009. p. 5499–5506 (Figura 1). Disponível em: <bibdigital.sid.inpe.br>.
- PADBERG, M.; RINALDI, G. A branch-and-cut algorithm for the resolution of large-scale symmetric traveling salesman problems. *Siam Review*, v. 33, n. 1, p. 60-100, 1991.

