

2

Estudos de Inventário de Bacias Hidrográficas

2.1.

Hidroeletricidade

A hidroeletricidade é uma das fontes de energia mais importantes desde o início do desenvolvimento da indústria de energia elétrica. Em 1896, a energia proveniente das Cataratas de Niagara, na divisa de fronteiras canadenses e americanas, era enviada até Buffalo, a aproximadamente 20 milhas de distância, através do primeiro sistema de transmissão AC de larga escala do mundo [20].

O Brasil foi um dos primeiros países a experimentar os efeitos dessa revolução na área de energia elétrica. Em 1883, entrou em operação a primeira usina hidroelétrica do país, na cidade de Diamantina [25]. No mesmo ano, Dom Pedro II inaugurou, na cidade de Campos, o primeiro serviço público municipal de iluminação elétrica do Brasil e da América do Sul [22]. Em 1899, a Light construiu a Usina Hidroelétrica Parnaíba, no Rio Tietê [16]. Em 1908, a Light inaugurou a Usina de Fontes, no município de Piraí, com 24 MW, potência muitas vezes superior às necessidades do Rio de Janeiro de então, mas que hoje é suficiente apenas para abastecer o bairro do Leme. Os equipamentos importados eram transportados por trem do Rio de Janeiro a Piraí e de lá seguiam em carro de boi até Ribeirão das Lajes. A usina Ilha dos Pombos, no Rio Paraíba do Sul, ainda hoje funcionando, entrou em operação em 1924 [23]. Cerca de um século após a Independência, o Brasil já dominava plenamente a tecnologia de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Ao longo das décadas seguintes, o país projetou e construiu um sofisticado sistema de geração de energia elétrica baseado fortemente no seu potencial hidroelétrico. Inicialmente as empresas privadas - como a Light - fizeram grandes investimentos em geração e distribuição [23]. Posteriormente, as empresas federais (grupo Eletrobras) fizeram investimentos tanto em geração quanto em transmissão, que vieram a constituir o Sistema Interligado Nacional (SIN). Simultaneamente as empresas estaduais (como Copel, Cemig e CESP) atuaram

nos três segmentos (geração, transmissão e distribuição), em suas respectivas áreas de concessão.

Como nos demais países, a disponibilidade de energia elétrica foi fator essencial para o processo de industrialização. Nos anos 60 e 70 do século XX, foram desenvolvidos os inventários das principais bacias hidrográficas para identificar os melhores locais para construção de usinas hidroelétricas. E as usinas foram construídas, sem preocupação em dar exclusividade para a empresa A ou B atuar em uma bacia hidrográfica particular. Situação que induziu a centralização das decisões operativas - para maximizar a coordenação da produção hidroelétrica de usinas diferentes localizadas em um mesmo rio de modo a evitar a descoordenação entre usinas de montante e de jusante - por meio do Grupo de Coordenação da Operação Integrada (GCOI), liderado pela Eletrobras [26].

A hidroeletricidade, hoje, é a energia renovável de maior importância ao redor do mundo, com pelo menos 715 GW de potência instalada e com capacidade de suprir quase 20% do consumo de eletricidade do mundo [32].

Apesar da vasta base hidroelétrica disponível, o grau de desenvolvimento desta fonte de energia varia imensamente de país para país, como mencionado anteriormente.

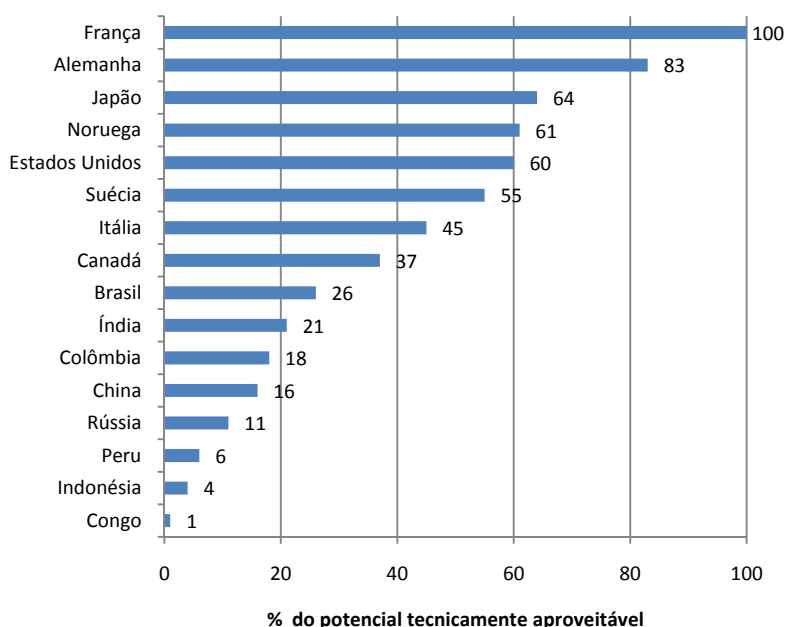


Fig.2 Estágio do desenvolvimento hidroelétrico ao redor do mundo¹.

Fonte: Elaborado pelo Autor, baseado em dados do World Energy Council [44].

¹ Consideram-se usinas em operação e em construção ao final de 1999. Os países selecionados detêm dois terços do potencial hidroelétrico mundial.

A Fig.2 mostra que países mais ricos já desenvolveram grande parte de seu potencial hidroelétrico, enquanto países de economias emergentes, como a China, a Índia e o Brasil, ainda possuem vasto potencial a ser explorado.

Dado que o crescimento futuro da demanda estará concentrado, em sua maioria, em países emergentes, o desenvolvimento de seus potenciais hidroelétricos é uma alternativa atraente, tanto do ponto de vista econômico quanto no que se refere à redução de emissões de CO₂.

2.2.

Pequenas Centrais Hidroelétricas

A capacidade total de PCHs ao redor do mundo é de 85 GW e a China possui 70% desta capacidade (65 GW). No entanto, o potencial para PCHs é significativo também em outros países, dentre eles, o Brasil (3,5 GW) e a Índia (2 GW) [31].

Preocupações referentes aos impactos do aquecimento global e à dependência de combustível fóssil importado motivaram governos ao redor do mundo a estabelecer políticas que fornecem incentivos para a instalação de fontes renováveis locais, como usinas hidroelétricas, eólicas, solares, maremotriz e de biomassa. O conjunto de medidas da União Européia referentes a clima e energia, conhecido como “European Union climate and energy package”, por exemplo, assumiu o compromisso de aumentar o consumo de energia de fontes renováveis (principalmente solar e eólica), que deve ultrapassar 20% do total consumido até 2020 [15].

Outro fator que contribui para o desenvolvimento das PCHs são restrições ambientais que muitas vezes inviabilizam a construção de projetos hidroelétricos de maior porte [8], principalmente aqueles com reservatórios operantes.

Algumas características adicionais contribuem para o desenvolvimento efervescente do mercado de PCHs no Brasil e no mundo [8][31]:

1. Incentivos regulatórios (explicados em maior detalhe na próxima seção, para o caso do Brasil);
2. Menor tempo de construção, que favorecem a contratação da energia por consumidores de grande porte à procura de opções de fornecimento que podem acompanhar de perto as suas necessidades de demanda;

3. Menor necessidade de recursos financeiros, o que aumenta o número de empresas capazes de atuar no mercado, por exemplo, investidores locais e estrangeiros, assim como fundos de “hedge”;
4. Reduzidos impactos ambientais, que descomplexificam e aceleram o processo de licenciamento ambiental;
5. Possibilidade de geração de receitas associadas ao Certificado de Redução de Emissões (créditos de carbono) do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo de Kyoto.

2.2.1.

Aspectos regulatórios

A ANEEL editou a Resolução N.º 393/1998 [6] que estabeleceu os procedimentos gerais para o registro e aprovação de estudos de inventário de bacias hidrográficas [37]. Estabelece ainda que os estudos podem ser realizados tanto pela ANEEL como por terceiros (após solicitação de registro) e que os custos incorridos nos estudos de inventários serão ressarcidos pelo vencedor da licitação, nas condições estabelecidas no edital.

Recentemente, amplificou-se o incentivo para a elaboração de estudos de inventário. A Resolução Normativa nº 343/2008 [5] estabelece que se assegure ao autor dos estudos de inventário o direito de preferência a, no máximo, 40% do potencial inventariado, ou, no mínimo, um aproveitamento identificado, desde que enquadrado como PCH. O objetivo era estimular que estes estudos sejam realizados e contribuir para o aumento da capacidade instalada de PCHs no país com recursos tanto públicos como privados.

Desde que foi publicada, a Resolução 343/2008 provocou uma “corrida” entre os empreendedores por solicitações de registros de estudos de inventário à ANEEL ou de pedidos de revisão de estudos de inventário antigos. Em diversos casos, os estudos mais antigos não aproveitavam a totalidade do potencial hidroelétrico. Isto porque na época em que estes inventários foram elaborados não havia condições econômicas que tornassem as PCHs economicamente atrativas.

Incentivos recentes contribuíram para alterar este quadro. Desde dezembro de 1996, existem incentivos específicos à venda de energia renovável através de contratos no mercado livre. Estes incentivos assumem a forma de descontos sobre

as tarifas de transporte e de distribuição para consumidores que compram energia através de contratos que são respaldados por projetos de energia renovável não convencional de até 30 MW [8]. Na prática, existe um subsídio cruzado sobre os investimentos nas redes de transmissão e distribuição. Consumidores regulados pagam mais (proporcionalmente) enquanto os consumidores livres, que contratam a energia renovável, pagam menos.

A Resolução ANEEL 247/2006 [4] estendeu o incentivo, permitindo a consumidores regulados com demanda superior a 500 kW (formalmente não são "consumidores livres") que contratem diretamente seu suprimento de energia com fontes renováveis. Em contrapartida, estes consumidores recebem um desconto de pelo menos 50% na "tarifa fio" (que remunera os investimentos na rede de distribuição e a tarifa por uso da rede de transmissão - TUST). A possibilidade de compra diretamente de produtores de energia renovável pode ser vantajosa devido à elevada tarifa para quem está conectado na rede da distribuidora (baixa tensão).

Dependendo da localização do consumidor, o benefício pode atingir 50 R\$/MWh, o que permite que firmem contratos com usinas renováveis a preços mais elevados, superiores até aos preços de abertura (teto) dos leilões para o mercado regulado.

Este mecanismo proporcionou um forte incentivo para a instalação de PCHs. De acordo com a ANEEL, 404 PCHs receberam autorização para construção, totalizando mais de 5.000 MW de potência instalada. Ainda há 674 pedidos de execução de estudos de inventário, que estão atualmente em revisão pela ANEEL [3].

2.3.

Desenvolvimento Integrado da Bacia Hidrográfica

Em alguns países, desenvolvedores de projetos recebem uma permissão de autoridades governamentais para o planejamento e a construção de uma usina hidroelétrica. O tamanho da usina é determinado pelo desenvolvedor do projeto de forma a maximizar a taxa interna de retorno (TIR). Apenas por sorte, esta decisão será aquela que maximizará o potencial hidroelétrico da bacia, e o que é pior, esta decisão pode esterilizar parte do potencial de projetos hidroelétricos, que garantiriam melhores benefícios globais para o consumidor (mais energia a um

menor custo).

Por esta razão, um conjunto de países realiza estudos integrados de desenvolvimento de bacias hidrográficas de forma a garantir um maior benefício aos consumidores no longo prazo e evitar que uma parte do potencial seja comprometida.

No Brasil, desde os anos 70, o passo inicial para o planejamento e a construção de usinas hidroelétricas em cascata é o desenvolvimento de inventários hidroelétricos [37]. Estes estudos de inventário caracterizam-se pela concepção e análise de várias alternativas de divisão de queda, formadas por conjuntos de aproveitamentos. Estas alternativas são comparadas entre si, sendo selecionada aquela que apresentar melhor equilíbrio entre os benefícios energéticos, os impactos sócio-ambientais e os custos de implantação, que já devem incluir uma estimativa dos custos de mitigação e compensação ambiental. Os aproveitamentos da alternativa selecionada na etapa de inventário constituem insumos para as etapas seguintes do planejamento da expansão da oferta de energia [37].

Os melhores locais são escolhidos inicialmente em termos de engenharia, para depois incorporar uma análise de custo-benefício. Recentemente (nos últimos 15 anos), o índice de custo-benefício de cada alternativa é combinado a um índice ambiental que captura os impactos negativos correspondentes. A melhor alternativa é aquela com o menor índice combinado [28]. Esta abordagem leva a uma exploração do potencial hidroelétrico de uma forma ambientalmente viável.

2.3.1.

O Manual de Inventário

Os estudos de inventário têm como referência obrigatória o Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas do MME [28]. Os levantamentos de dados e informações na bacia constam de pesquisas hidrológicas, geológico-geotécnicas, cartográficas e ambientais. De fato, para a realização dos estudos básicos, é necessária a instalação de equipamentos como marcos topográficos, réguas para medição de nível, postos fluviométricos e sedimentométricos, uso de trado para sondagens geológicas e para coleta de amostras para análise da qualidade da água. Todos estes equipamentos, por seu porte e forma de utilização, ocasionam interferências mínimas sobre o meio natural [37].

Com relação aos dados ecológicos e sócio-econômicos da bacia, também de acordo com o Manual de Inventário [28], estes são obtidos através de levantamentos de dados secundários ou reconhecimento de campo fora de áreas legalmente protegidas. A avaliação dos aproveitamentos e a comparação de alternativas de divisão de queda são realizadas comparando o resultado da análise da potencialidade energética, dos custos de implantação e dos impactos sócio-ambientais. Desta forma, as alternativas que apresentarem índices de impactos sócio-ambientais muito altos tendem a não serem consideradas as melhores alternativas [34].

Então, o Manual de Inventário [28] fornece um conjunto de procedimentos e instruções que precisam ser observados para garantir que os resultados de estudos de inventário distintos sejam homogêneos e comparáveis, mesmo que eles tenham sido desenvolvidos por autores diferentes ou em diferentes épocas.

Vale ressaltar que estudos de inventário podem ser elaborados por qualquer pessoa física ou jurídica, em que pese a atribuição da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), bastando para tanto solicitar registro à ANEEL [37].

É importante mencionar que a Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, autoriza a criação da EPE, estabelecendo em seu Art. 2º que ela tem por finalidade prestar serviços na área de estudos destinados a subsidiar o planejamento do setor energético. Ademais, o Decreto nº 5.184, de 16 de agosto de 2004, estabelece em seu Art. 6º que compete à EPE, entre outras atribuições, (i) identificar e quantificar os potenciais de recursos energéticos e (ii) realizar estudos para a determinação dos aproveitamentos ótimos dos potenciais hidráulicos [37].

2.3.2.

Potencial Hidroelétrico Remanescente

Como visto, a preparação de estudos de inventário é importante porque é o ponto inicial no processo relativo à instalação de novas usinas hidroelétricas. Ou seja, este passo é crucial em um país como o Brasil, que ainda possui mais de 160.000 MW de potencial hidroelétrico inexplorado. O potencial hidroelétrico restante, a ser explorado no Brasil, está localizado nos afluentes de margem leste do Rio Amazonas e em pequenas bacias hidrográficas, próximas aos grandes centros de demanda (São Paulo, Rio de Janeiro, etc.), que foram negligenciadas

no passado [8].

A construção de projetos de grande porte nos afluentes do Amazonas está representada pela construção de duas usinas na bacia do Rio Madeira, totalizando mais de 7.000 MW com entrada em operação em 2012, além do projeto de 11.000 MW de Belo Monte, aguardado para 2015. Antecipa-se que restrições sócio-ambientais (como a floresta Amazônica, reservas indígenas e outras questões sensíveis) fortemente em destaque naquela região vão possivelmente reter projetos adicionais desta magnitude no futuro. Isto significa que o potencial hidroelétrico restante virá de bacias hidrográficas menores, ideais para a instalação de PCHs, que, de acordo com os regulamentos brasileiros, precisam ter uma potência instalada de 30 MW ou menos [8].

2.4.

Otimização de Estudos de Inventário

A divisão de quedas ótima, que define os locais de barramento e, para cada local, o dimensionamento das estruturas e potência a instalar, pode ser formulada como um problema misto de programação matemática linear-inteira (MILP).

A função objetivo consiste em maximizar o benefício líquido, calculado como a receita gerada pela hidroeletricidade menos os custos de construção dos projetos, incluindo compensações ambientais, como, por exemplo, a reconstrução de eventuais infraestruturas impactadas (tais como pontes e estradas). Pode-se demonstrar que esta formulação conjunta (envolvendo todos os projetos) induz o máximo bem estar social, trazendo maior benefício aos consumidores.

Isto acontece porque ao maximizarmos o benefício líquido proporcionado por todos os projetos que podem ser desenvolvidos em um determinado rio (desenvolvimento integrado da bacia hidrográfica), alcançamos um máximo global, que garante ao consumidor mais energia (múltiplos projetos ao longo do rio) a um menor custo. Se for permitido ao desenvolvedor escolher “a dedo” o melhor local individual (maximizando o benefício líquido de cada local separadamente), encontraríamos soluções viáveis subótimas (não garantidamente ótimas) para o problema de otimização (ao invés do máximo global) [14]. Isto prejudicaria o consumidor, pois impediria o futuro desenvolvimento de projetos hidroelétricos ótimos a montante, que garantiriam melhores benefícios globais

para ele.

Ou seja, o problema de otimização proposto não é separável [2]. Isto significa que $Max(A + B) \neq Max(A) + Max(B)$. Isto é comprovado porque as variáveis envolvidas na formulação do problema não são independentes, isto é, as restrições de cada parcela (A e B) são relacionadas entre si [29]. Desenvolver o rio de forma integrada corresponde à maximização conjunta do benefício líquido dos projetos disponíveis, atingindo um máximo global. No entanto, se cada usina a ser instalada no rio for desenvolvida como um projeto individual (não há desenvolvimento integrado do rio), a divisão de quedas resultante apresentará um benefício líquido menor do que o anterior (esta solução final seria um máximo local e não global [42]). Portanto, a formulação conjunta é a mais vantajosa para o consumidor. Com isto, este trabalho descreve uma abordagem baseada em otimização para o desenvolvimento integrado de projetos hidroelétricos em uma bacia hidrográfica. O arranjo hidroelétrico ótimo em cascata consiste em, basicamente, local, altura de queda, volume da barragem e potência instalada de cada usina ao longo do rio.

Com respeito às restrições, uma característica importante do modelo é que ele pode considerar centenas ou mesmo milhares de locais candidatos ao longo do rio, distanciados entre si de um valor definido. O problema tem natureza combinatória, pois implicitamente são examinadas todas as alternativas de divisão de quedas viáveis. Se cada um dos N locais candidatos pode receber uma usina, existem 2^N combinações possíveis. Por outro lado, uma usina implantada em um local, com certa altura de queda, possivelmente inviabiliza a implantação de usinas em locais vizinhos. Então existe um acoplamento espacial das decisões. Isto significa que uma grande proporção de possíveis combinações de usinas hidroelétricas, se construídas, seriam incompatíveis entre si. Um conjunto de “restrições de compatibilidade” garante que isso não ocorra, ou seja, que todas as soluções do problema possuam arranjos de cascata viáveis. Além disso, restrições especiais, como a área máxima de reservatórios, a distância de áreas ambientalmente sensíveis, e etc., podem ser incluídas na formulação.

Outra importante característica do modelo é que, para cada local candidato, não existe uma altura de queda pré-definida. Isto significa que o modelo de otimização possui dois tipos de variáveis de decisão: (i) uma variável binária (1 ou 0) igual a 1, se uma usina hidroelétrica deverá ser construída em determinado

local candidato e 0, caso contrário; e (ii) uma variável de decisão contínua referente à altura de queda, que será nula se este local não for selecionado. Outras variáveis derivadas, como o volume do reservatório constituído e a potência a ser instalada, são consideradas indiretamente através destas variáveis principais por meio de pré-processamentos adequados. Por isso, o custo de investimento em cada local é uma função contínua da altura de queda.

A construção desta função de custo é um problema desafiador porque o projeto de engenharia civil de uma usina hidroelétrica pode variar bastante se a queda bruta do projeto passar de 15 metros para 18 metros, por exemplo.

Este problema motivou o desenvolvimento de um pré-processador automatizado de projetos de usinas hidroelétricas. Seu objetivo é determinar o projeto ótimo da usina e seu correspondente custo de investimento para uma série discreta de valores de altura de queda. Estes custos são, então, interpolados para produzir uma função de custos linear por partes, que é usada no modelo de otimização.

Nota-se que a relação entre custos de investimento e altura de queda pode ter qualquer forma. Portanto, se considerarmos funções que relacionem estas grandezas, tais funções podem ser não-convexas. Estas eventuais não-convexidades são controladas por variáveis adicionais incluídas na formulação do problema. Portanto, além de variáveis inteiras utilizadas nas decisões de investimento, existem outras variáveis que são incorporadas à formulação, quando os custos de investimento se apresentam como funções não-convexas da altura de queda. A Fig.3 exhibe esta utilização.

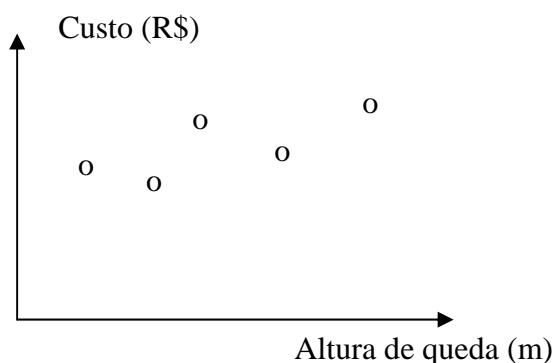


Fig.3 Função não-convexa².

Fonte: Elaborado pelo Autor.

² Esta função representa os pontos pré-processados de altura de queda e seus respectivos custos calculados.

Pela Fig.3, vemos a necessidade da inserção de novas variáveis para transformar a função discreta representada em uma função contínua, que atenda a qualquer valor de altura de queda. Estas variáveis significam pesos dados às alturas de queda pré-processadas, de modo a criar um novo valor de altura de queda que seja uma combinação linear dos valores pré-processados. Uma vez encontradas estas variáveis, calcula-se, através de uma combinação linear equivalente, o valor de custo da nova altura de queda.

Estas variáveis são definidas através de algoritmos de Branch & Bound [43]. Estes algoritmos dividem o problema em uma série de problemas menores, resolve os problemas menores e depois agrega as informações obtidas para solucionar o problema original. Neste caso, uma variável w seria incluída na formulação do problema, de forma que: $\sum_{k=1}^N w_k = 1$, onde N é o número de valores de altura de queda pré-processados. Vê-se que possíveis soluções para o problema seriam:

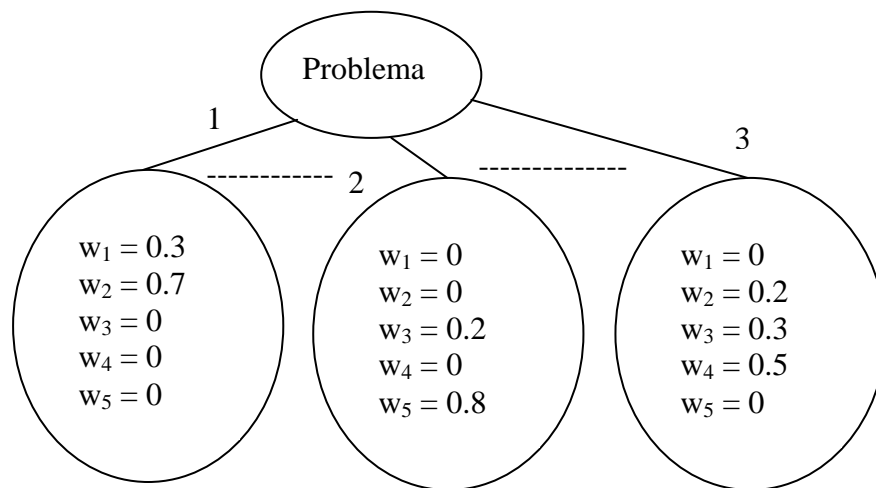


Fig.4 Possíveis soluções para o problema de otimização.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Fig.4 exemplifica três possíveis soluções para a aproximação da função do problema de otimização em questão. Ao analisarmos a Fig.3, vemos que apenas a solução de número 1 apresentada na Fig.4 seria aplicável. Isto porque não faz sentido dar pesos diferentes de zero a duas variáveis que não são consecutivas. Afinal, todo ponto de altura de queda procurado se encontra entre dois pontos pré-processados consecutivos. Desta forma, a solução 2 é inviável e não se aplica. O mesmo acontece com a solução 3, pois não é possível que um

ponto de altura de queda para aproximação da função esteja entre três pontos distintos (com pesos diferentes de zero). Então, nota-se que se apenas o método do Branch & Bound fosse utilizado, possíveis soluções seriam analisadas desnecessariamente, pois são inviáveis [43].

Assim, um conjunto de restrições do tipo SOS2 (“Special Ordered Sets of Type 2”) [10] é utilizado de maneira a reduzir o esforço computacional do método de solução empregado (Branch & Bound). Estas restrições garantem que apenas duas variáveis sejam diferentes de zero (e sua soma seja igual a 1) e que estas duas variáveis sejam consecutivas. Com estas restrições, o problema se torna bem menor e mais fácil de se resolver. A Fig.3 é, então, aproximada para:

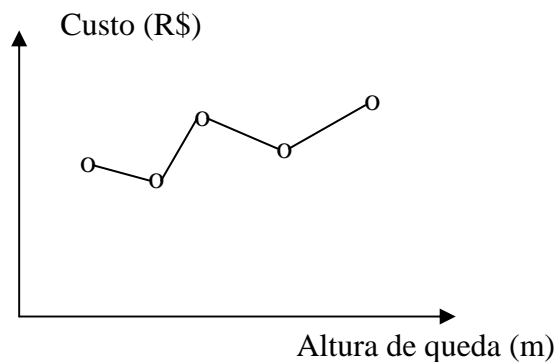


Fig.5 Função não-convexa aproximada para uma função linear por partes.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Foi utilizado um módulo de custos, chamado SISOHR [11], descrito em 0, criado a partir do Manual de Inventário [28] para o pré-dimensionamento das estruturas de engenharia da usina, e para a estimação de investimentos e da Conta 10 (custos ambientais de um estudo de inventário). O módulo é executado para diferentes alternativas de altura de queda, e seus resultados são interpolados para produzir a função de custo linear por partes, que compõe a função objetivo.

Para a criação deste modelo, é fundamental a existência do módulo de custos SISOHR e de bases de dados públicas e gratuitas que podem fornecer a hidrologia e topografia da região, como apresentado no fluxograma da Fig.6.

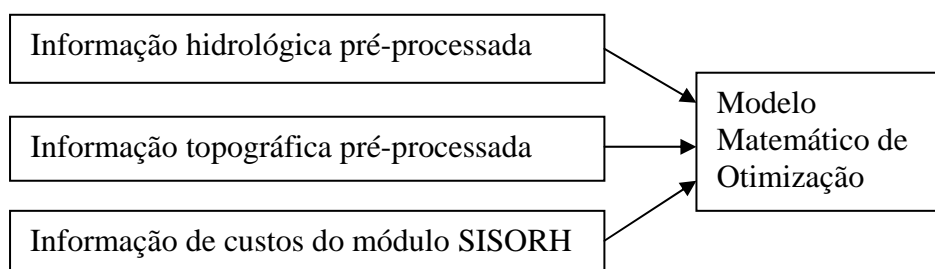


Fig.6 Fluxograma simplificado que indica as entradas do modelo.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.4.1.

Bases de Dados Públicas e Gratuitas

Como mencionado, estudos de inventário identificam o potencial hidroelétrico em uma determinada bacia hidrográfica e determinam o local de projetos hidroelétricos candidatos. O potencial hidroelétrico é proporcional à altura de queda (H) e à vazão (Q). Estes dois componentes são informações essenciais para o desenvolvimento de estudos de inventário. Por isso, é importante (i) estabelecer o regime hidrológico; e (ii) caracterizar a topografia da região.

2.4.1.1.

Estabelecimento do Regime Hidrológico

Estabelecer o regime hidrológico usualmente consiste em transpor dados de vazão de estações hidrológicas disponíveis aos locais selecionados dos projetos, através de uma combinação de técnicas (como por exemplo, relações de áreas de drenagem, análise de regressão, ou o uso de modelos físicos chuva-vazão).

Se não existir algum tipo de dado de vazão no local desejado, é necessário estimar valores a partir de informações de postos fluviométricos próximos. A este procedimento, dá-se o nome de regionalização hidrológica. A forma mais simples de regionalização hidrológica é o estabelecimento de uma relação linear entre a vazão e a área de drenagem da bacia.

É necessário estimar a vazão média em um local sem dados localizado em um rio, no ponto A, em que a área de drenagem é conhecida. Para aplicar a relação entre áreas de drenagem, basta conhecer dados de vazão de um posto

fluviométrico localizado no mesmo rio, no ponto B, com área de drenagem também conhecida. Assim, a vazão média no ponto A pode ser estimada por:

$$Q_A = Q_B \cdot \frac{\text{Área}_A}{\text{Área}_B} \quad (2.1)$$

Obviamente, este método tem muitas limitações e não pode ser usado quando a bacia for muito heterogênea quanto às características de relevo, clima, solo e geologia. Para estimar vazões máximas em locais sem dados, este método tende a superestimar as vazões quando a área de drenagem do ponto sem dados é maior do que a área de drenagem do ponto com dados.

Se existem ao menos algumas medições de vazões para o posto fluviométrico desejado e medições de postos fluviométricos vizinhos, é possível obter dados de vazão para o posto desejado por regressão linear. A equação da regressão linear é:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad (2.2)$$

Onde Y representa os dados de vazão do posto fluviométrico desejado, X representa os dados de vazão do posto fluviométrico vizinho, ε é a variável que inclui todos os fatores residuais mais os possíveis erros de medição e α e β são coeficientes, estimados da seguinte forma:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum X^2 \sum Y - \sum (XY) \sum X}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2.3)$$

$$\hat{\beta} = \frac{n(\sum XY) - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (2.4)$$

Estas fórmulas podem ser obtidas pelo método de Mínimos Quadrados. Vale lembrar que os resíduos ε devem satisfazer determinadas hipóteses, que são: serem variáveis normais, com a mesma variância σ^2 (desconhecida), independentes entre si e independentes da variável explicativa X.

Existem casos em que estações fluviométricas não estão disponíveis, mas estações pluviométricas sim (há medições de intensidade das chuvas). Ou, existem mais estações pluviométricas que fluviométricas. Nestes casos, é comum a utilização de modelos chuva-vazão. Há uma fase de calibração destes de maneira que os padrões de chuvas (entrada) sejam transformados em vazões (saída) o mais

proximamente possível com relação às vazões observadas. Este procedimento, obviamente, depende da existência de um registro histórico concomitante de pluviometria e fluviometria. Uma vez calibrado o modelo, é possível empregá-lo para estender as séries de vazões a partir das informações de chuvas.

Modelos de chuva-vazão podem ser simples, possuindo apenas dados pluviométricos como entrada e obtendo dados de vazão como saída ou podem ser complexos, definindo com maior precisão o ciclo hidrológico, por meio da inclusão de variáveis para chuva, infiltração, interceptação, existência de água no solo, percolação, escoamento superficial, escoamento sub-superficial, escoamento em rios, evapotranspiração e até o papel da vegetação no ciclo.



Fig.7 Ciclo hidrológico da água.

Fonte: Obtido de [39].

O modelo de chuva-vazão simples pode ser escrito, por exemplo, pela fórmula $Q_p = \frac{C.i.A}{3,6}$, onde Q_p é a vazão de pico em m^3/s , C é um coeficiente de escoamento, i é a intensidade da chuva (em mm/hora) e A é a área da bacia (em km^2). Este método, conhecido como método racional, calcula apenas a vazão máxima; não calcula o volume ou a forma do hidrograma. Por sua simplicidade, ele é utilizado apenas para pequenas bacias.

Modelos mais complexos utilizam como entrada, além da precipitação, dados de evapotranspiração e variáveis meteorológicas, como a temperatura, a

umidade relativa do ar, a radiação solar, a pressão atmosférica e a velocidade do vento. Também existem modelos que utilizam dados de vazão históricos já obtidos no passado, o que é muito comum em modelos que precisam ser calibrados.

A Fig.8 mostra os processos hidrológicos mais comumente representados em modelos de chuva-vazão.

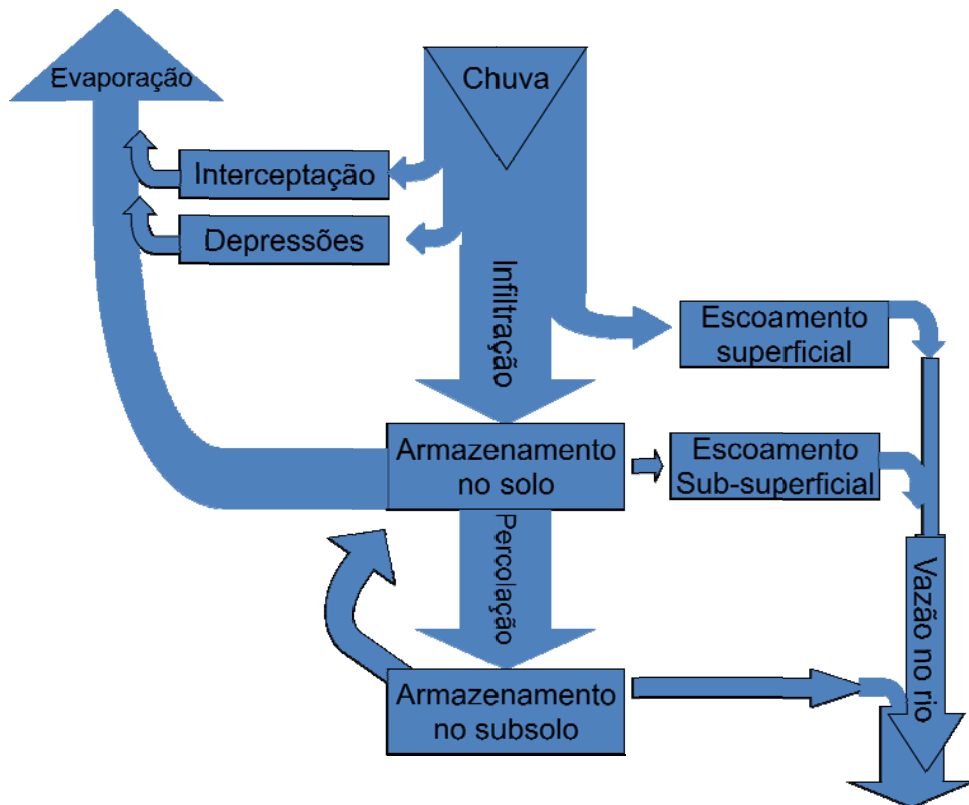


Fig.8 Processos do ciclo hidrológico³.

Fonte: Obtido de [39].

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 como interessantes para realizar a transposição de dados.

Ou seja, para a automatização de estudos de inventário no Brasil, temos disponíveis as informações de vazão; basta saber se existe na base de dados

³ Tipicamente representados em modelos chuva-vazão.

HidroWeb dados de vazão exatamente para os locais candidatos ou se será necessária a realização de transposição de dados, a partir de dados de vazão de locais vizinhos aos locais candidatos.

2.4.1.2.

Caracterização da Topografia da Região

Pesquisas de campo são necessárias para adquirir a cartografia da região dos reservatórios e a topografia dos locais selecionados, já que a informação disponível apresenta escalas inadequadas para a finalidade de desenho do projeto. A aquisição de fotografias aéreas ou a realização de sobrevôos que precisam cobrir a bacia hidrográfica inteira em escalas adequadas, seguidas de restituição aerofotogramétrica é, sem dúvida, o aspecto mais caro em estudos de inventário. Isto não é surpreendente, uma vez que as bacias hidrográficas para a implantação de usinas possuem áreas de drenagem superiores a 100 km², podendo em alguns casos, atingir alguns milhares de quilômetros quadrados.

Um item crítico no cálculo do custo do projeto é o volume de material (concreto, terra, etc.) que deve ser usado na construção da barragem. Este volume depende, entre outras coisas, do perfil transversal topográfico do rio no local candidato. Como mencionado, a topografia da bacia é um dos itens mais onerosos nos estudos de inventário. Além disso, no caso de países em desenvolvimento, a possível ausência de dados básicos, como a topografia (ou a hidrologia regional), representa uma barreira à avaliação do potencial hidroelétrico.

Felizmente, avanços recentes em informações por satélite proporcionaram a possibilidade de execução de estudos de inventário antes da realização de uma pesquisa de campo propriamente dita, reduzindo a distância entre a abordagem “tradicional” descrita acima – cara e demorada – e uma abordagem mais sistemática, baseada em informações por satélite. Desde 2009, a NASA – Agência Espacial Norte Americana – divulgou uma base pública de dados, conhecida como “Global Digital Elevation Model” (GDEM) [27]. GDEM é baseada em 1,5 milhões de imagens tiradas por um instrumento chamado ASTER (“Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer”), instalado no satélite Terra da NASA, lançado em dezembro de 1999.

O ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM), fruto da cooperação

entre o METI (Ministério de Economia, Comércio e Indústria do governo japonês) e a NASA [27] é um bom exemplo de uma poderosa fonte de informação topográfica (latitude, longitude e altitude) gratuita que abrange a maior parte do globo e que foi recentemente (2009) lançada a público.

ASTER GDEM, produto do METI e da NASA, foi criado pelo empilhamento de modelos digitais de terreno mascarados por nuvens e usando um algoritmo para remover dados estatisticamente anormais. Vários modelos digitais de terreno existentes foram usados como referência para corrigir eventuais anomalias residuais, principalmente onde apenas um número limitado de blocos de informações estava disponível.

O resultado do ASTER GDEM é uma base de dados quase global (todas as longitudes e latitudes desde o 83° Norte até o 83° Sul estão presentes) com resolução horizontal de 30 metros e precisão vertical de 20 metros com um intervalo de confiança de 95%. Este nível de resolução topográfica é próximo àquele de estudos aéreos iniciais, e pode, então, ser utilizado para construir os perfis do rio requisitados pelo módulo de custos. Isto é feito pelo modelo de pré-processamento, que lê a base pública da NASA [27] e constrói o perfil do rio para cada local candidato. Cada arquivo obtido pela base pública cobre uma área de 1° de latitude e 1° de longitude, ou aproximadamente (111 x 111) km².

Utilizar uma primeira aproximação do terreno a partir de dados públicos é uma alternativa interessante, que alavanca a utilização deste modelo, quando não existem dados mais específicos.

2.4.2.

SISORH: O Módulo de Custos

O valor do investimento necessário para a realização de um empreendimento é um dado fundamental, se não o mais importante, para a tomada de decisões corretas relativas à sua execução. No caso específico de projetos para a geração de energia hidroelétrica, o custo das obras é o fator determinante da tarifa a ser aplicada para a recuperação do investimento, uma vez que os custos operacionais são comparativamente muito menores. Para o consumidor, em um sistema predominantemente hidroelétrico como o brasileiro, a tarifa a ser paga no futuro depende diretamente de uma seleção adequada por parte do governo dos

investimentos a serem feitos para aumentar a capacidade de geração do setor elétrico brasileiro.

Para o investidor, um desvio muito grande entre o orçamento e o custo efetivo da obra pode ter resultados desastrosos. Além disso, quando as obras são realizadas em regime de parceria, os orçamentos são necessários para definir a participação de cada parceiro. Por isso, o orçamento é a principal referência para o acompanhamento e controle da execução dos projetos hidroelétricos.

O Sistema Eletrobras, ao longo dos anos, trabalhou com inúmeros orçamentos de hidroelétricas correspondentes a níveis de estudo de inventário, viabilidade, projeto básico e projeto executivo. No decorrer deste período, diversas questões tiveram que ser tratadas para melhorar a confiabilidade destes orçamentos. Dentre estas questões, devem ser destacadas as seguintes:

- Os orçamentos provenientes de diversas fontes não seguiam um padrão, o que levou à criação do Orçamento Padrão Eletrobras (OPE) [13];
- As diferentes datas de referência dos orçamentos, aliadas ao processo inflacionário, criavam dificuldades para a obtenção de custos atualizados;
- Os custos apresentados por várias empresas possuíam grandes discrepâncias, que, a princípio, não eram explicáveis logicamente.

Mais detalhes sobre o módulo de custos SISRORH podem ser vistos no ANEXO A desta dissertação.

2.4.1.3.

Integração entre o SISRORH e o Modelo Proposto

O Sistema de Elaboração e Análise de Orçamentos de Hidroelétricas (SISRORH) foi integrado ao modelo de otimização e de programação matemática, tema deste trabalho, e calcula os custos de cada arranjo (cada local candidato e altura de queda), seguindo o Orçamento Padrão Eletrobras (OPE) [13]. São incluídos pelo programa custos civis, eletromecânicos, ambientais, e indiretos, ou seja, o SISRORH abrange toda a parte orçamentária dos projetos candidatos.

Assim, o SISRORH elabora, por meio de simulações, os orçamentos dos empreendimentos, podendo levar em conta todos os detalhes dos processos construtivos, do planejamento executivo e das condições de execução dos

serviços. O sistema é adequado para orçamentos em fases de estudo que vão desde o inventário hidroelétrico até o projeto executivo das usinas [11].

Na última versão, está sendo incorporado ao SISOH um conjunto de facilidades para a comparação e análise de orçamentos, incluindo mecanismos de geração e cálculo de índices, cadastramento de orçamentos gerados externamente, atualização de orçamentos e geração de tabelas [11]. A versão do AutoCAD [9] utilizada pelo programa também foi atualizada, sendo possível, nesta última versão, calcular as seções transversais do rio automaticamente, a partir da construção do terreno feita pelo AutoCAD [9].