

Desenvolvimento de Sistema para Análise e Avaliação do Potencial Energético de PCH's na Área de Concessão da CERJ

E. Kaviski, LACTEC; R. F. C. Gibertoni, LACTEC; W. Mazer, LACTEC; M. Müller, LACTEC; A. T. Calmon, LACTEC e I. I. Müller, LACTEC

RESUMO

Este artigo objetiva apresentar o método que permite avaliar e estabelecer o limite físico do potencial hídrico e energético das bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro, de forma automática, bastando a identificação de um ponto da bacia hidrográfica desejada, através das suas coordenadas. Para tanto, foram pesquisadas e implementadas diversas técnicas de regionalização. Uma das técnicas utiliza a lógica difusa na definição de regiões homogêneas. Acredita-se que as variáveis estimadas ganharam maior precisão dada à utilização da classificação difusa e das ferramentas de geoprocessamento, que possibilitaram a determinação de parâmetros para bacias hidrográficas sem dados observados. Como produto final são fornecidas informações hidrológicas regionalizadas e o respectivo valor energético associado em qualquer ponto selecionado para análise.

PALAVRAS-CHAVE

Geoprocessamento, PCH's, potencial energético, regionalização.

forma automática, bastando a identificação de um ponto da bacia hidrográfica desejada, através das suas coordenadas.

A metodologia proposta para estabelecer o limite físico do potencial energético de uma bacia necessita de grandezas hidrológicas, em qualquer ponto dos cursos de água sujeitos a exploração por PCH's, e das correspondentes curvas de permanência das vazões diárias. As informações hidrológicas necessárias à avaliação do potencial hídrico são as de séries de vazões médias diárias e vazões mínimas. Para a obtenção de dados hidrológicos em regiões com inexistência de informações, são usadas diversas técnicas de regionalização baseadas na identificação de regiões homogêneas, seja quanto ao aspecto meteorológico, climatológico, tipo de solo, cobertura vegetal, declividade da bacia, etc. Muitas das técnicas consideradas neste projeto foram utilizadas em estudos de regionalização desenvolvidos para o Estado do Paraná [6].

I. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta as atividades desenvolvidas para o projeto de pesquisa denominado “*Desenvolvimento de Sistema para Análise e Avaliação do Potencial Energético de PCH's na Área de Concessão da CERJ*”. Este projeto é um estudo contratado pela Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro – CERJ, junto ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, visando o desenvolvimento de um Sistema Computacional que permite avaliar e estabelecer o limite físico do potencial hídrico e energético das bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro, de

II. DADOS E PARÂMETROS BÁSICOS

Os dados utilizados na regionalização hidrológica compreendem os dados coletados com a finalidade de caracterizar o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas analisadas, pertencendo a esta categoria os dados fisiográficos, meteorológicos e pluviométricos e ainda os dados fluviométricos básicos extraídos das séries históricas das estações selecionadas para o projeto.

Foram utilizados os dados fluviométricos de 56 estações fluviométricas, cujos valores foram fornecidos pela ANEEL. Todas as estações utilizadas possuem mais que 10 anos de registros e área de drenagem igual ou superior a 23 km². Foram utilizados os registros de precipitações diárias de 1 leitura de 94 estações pluviométricas fornecidas pela ANEEL. Procurou-se selecionar uma rede de estações representativa da pluviometria de todo o Estado do Rio de Janeiro, incluindo regiões nas divisas com os Estados do Espírito Santo, São Paulo e Minas Gerais, de forma a propiciar extrapolações mais confiáveis no limite do Estado. Os dados meteorológicos utilizados foram fornecidos pelo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Foram coletados os valores médios mensais e de longo termo de 14 estações meteorológicas. As grandezas

Este trabalho foi totalmente financiado pela Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro.

E. Kaviski trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: ekaviski@lactec.org.br).

R.F.C. Gibertoni trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: rosana@lactec.org.br).

W. Mazer trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: wellington@lactec.org.br).

M. Müller trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: muller@lactec.org.br).

A.T. Calmon trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: atcalmon@lactec.org.br).

I. I. Müller trabalha no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (e-mail: ingrid@lactec.org.br).

pesquisadas são: temperatura, umidade relativa do ar e total de horas de insolação.

Foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento que, a partir dos dados de altimetria e hidrografia do Estado do Rio de Janeiro e bacias adjacentes, geram informações fisiográficas, tais como: área de drenagem de bacias, comprimento de talvegues, desnível entre a foz e a nascente e declividades de trechos de rio. Além destas informações, foram processados dados de vegetação e tipo do solo. Estes dados formam o arcabouço para a regionalização hidrometeorológica proposta.

III. PARAMETRIZAÇÃO DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS

A. Geral

As séries de vazões das estações fluviométricas selecionadas foram caracterizadas por parâmetros estatísticos e foram ajustadas distribuições teóricas de probabilidades representativas destas séries.

B. Vazões Médias Diárias e Mensais

Foram utilizadas as séries de vazões médias diárias e mensais para a obtenção da curva de permanência de vazões médias diárias e mensais e dos parâmetros estatísticos representativos das séries históricas. Os parâmetros representativos das séries históricas de vazões médias diárias são: vazão média de longo período; coeficiente de variação das vazões médias diárias; coeficiente de assimetria; coeficiente de correlação em série das vazões médias diárias; momentos com pesos probabilísticos de ordem 1 a 3 das vazões médias diárias. Os parâmetros representativos das séries de vazões médias mensais são: vazões médias mensais dos meses i ; coeficiente de variação das vazões médias mensais dos meses i ; coeficiente de assimetria; coeficiente de correlação em série das vazões médias mensais; matriz de correlação cruzada das vazões médias mensais; momentos com pesos probabilísticos de ordem 1 a 3 das vazões médias mensais. As funções densidade de probabilidade usadas nas vazões médias diárias e mensais foram escolhidas com base em estudos anteriores [4], [5] e [6]. Foram consideradas as seguintes distribuições de probabilidades: Exponencial, Log-Logística, Weibull, Lomax, Pareto, Log-Gumbel e Log-Normal.

C. Regionalização da Vazão Média de Longo Período

A regionalização da vazão média de longo período é realizada utilizando-se a equação do balanço hídrico simplificado. As variações de armazenamento foram consideradas desprezíveis, devido ao uso da equação na escala de tempo anual. As perdas foram estimadas pelo modelo CRLE [2]. O modelo CRLE é um modelo climatológico que estima a evapotranspiração e a evaporação a partir de dados coletados rotineiramente nas estações meteorológicas. Os

dados meteorológicos utilizados pelo modelo CRLE são de temperatura, umidade relativa do ar e número de horas de insolação. O modelo é baseado no conceito de relação complementar entre evapotranspiração potencial e real.

D. Vazões Mínimas Médias para Várias Durações de Estiagem

O estudo contemplou vazões mínimas para várias probabilidades de ocorrência e magnitude média correspondente a períodos de diferentes durações. Foram escolhidas distribuições de probabilidades que usualmente são consideradas como modelos satisfatórios quando aplicados a séries de vazões mínimas, tais como: Galton ou Log-Normal a 3 parâmetros, Weibull ou Extrema tipo III, Log-Pearson tipo III e Log-Gumbel. Os parâmetros dos modelos foram estimados pelo método dos momentos. Como critério para classificação dos ajustes obtidos para cada estação foram calculados os índices de adequação de ajustes qui-quadrado e razão de verossimilhança.

E. Análise de Curvas de Recessão

Sendo o período de estiagem de uma bacia regido pela contribuição das águas subterrâneas aos cursos de água, em regime de ausência de precipitação, foi considerado no estudo de regionalização de vazões mínimas o parâmetro chamado expoente da curva de recessão (α).

IV. REGIONALIZAÇÃO DOS DADOS BÁSICOS

O processo de transferência de informações climatológicas para locais sem dados observados foi realizado com o auxílio da técnica de interpolação ponderada. A interpolação espacial dos dados climatológicos é necessária para obter estimativas destes parâmetros em diversos pontos das bacias para cálculo dos valores médios representativos. É suposto que as observações $h(\underline{x}_1), \dots, h(\underline{x}_n)$ de uma variável regionalizada $h(\underline{x})$, são avaliadas em função de suas localizações ou características, descritas pelos vetores cartesianos $\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n$, sendo n o número de locais e \underline{x}_i representa o local da estação por meio de suas coordenadas.

V. DESCRIÇÃO DAS TÉCNICAS DE REGIONALIZAÇÃO

O processo de transferência de informações hidrológicas para locais sem dados observados foi realizado com o auxílio das seguintes técnicas de análise regional: I) análise de agrupamentos; II) análise discriminante; e III) interpolação espacial.

As técnicas de análise de agrupamentos (“clusters”) têm por objetivo organizar conjuntos de dados para identificação de objetos (por exemplo: bacias hidrográficas) de forma que exista similaridade dentro dos grupos e

dissimilaridade entre os grupos. Genericamente, o problema de agrupamentos pode ser descrito considerando que existe um conjunto de n vetores num espaço vetorial \mathbb{R}^p , e que a análise de agrupamentos deve solucionar o problema de decompor o conjunto em K sub-conjuntos, de maneira que cada sub-conjunto contenha vetores que possuam alguma característica similar uns em relação aos outros [3]. Dentre as muitas técnicas de análise de agrupamentos existentes adotou-se a técnica de análise difusa implementada pelo algoritmo “*c-means*”. A análise difusa é classificada como uma das técnicas dos Sistemas Inteligentes e baseia-se na linguagem natural da comunicação humana [1].

Considerando que um conjunto de n vetores em \mathbb{R} , representando n bacias hidrográficas, foi particionado em K grupos, a análise discriminante tem por objetivo alocar uma dada bacia hidrográfica em um destes K grupos tendo como base as suas características fisiográficas representadas pelo vetor \underline{x} [3]. A regra discriminante utilizada foi a regra de Bayes, em que, a probabilidade a priori de que o vetor \underline{x} pertença a cada grupo é proporcional ao número de bacias hidrográficas que foram alocadas em cada grupo.

Tendo sido decidido o grupo ao qual o vetor \underline{x} pertence, então são estimados os parâmetros de escoamento em locais sem dados através da interpolação ponderada entre as estações pertencentes ao mesmo grupo. Os pesos considerados dependem exclusivamente do inverso do quadrado da distância entre o vetor \underline{x} do local de interpolação e os vetores \underline{x}_k dos locais com dados. A distância considerada neste trabalho é conhecida como distância de Mahalanobis.

VI. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

O método desenvolvido para avaliação do potencial energético de pequenas centrais hidrelétricas na área de concessão da CERJ pode ser aplicado através de um programa para computador, onde o usuário seleciona a bacia hidrográfica referente ao rio a ser analisado, em função de um conjunto de parâmetros de entrada. Como resultado, são fornecidos para o usuário uma relação com os possíveis locais e características das usinas que poderão ser instaladas.

São necessários 2 conjuntos de dados. Através do primeiro conjunto de dados são definidos os limites de dimensionamento que identificam pequenas centrais hidrelétricas, que são os seguintes: (i) capacidade instalada mínima (P_{min}) e máxima (P_{max}), em MW; (ii) área de alagamento mínima (A_{min}) e máxima (A_{max}), em km^2 ; e (iii) altura da barragem mínima (H_{min}) e máxima (H_{max}), em m. Todos estes limites, geralmente, são especificados por normas estabelecidas pela ANEEL.

No segundo conjunto de dados são informados os parâmetros que devem ser usados para dimensionar os aproveitamentos: (i) perdas hidráulicas (Ph); (ii) indisponibilidade forçada (If); (iii) indisponibilidade programada (Ip); (iv) rendimento das turbinas (Rt); (v) rendimento dos geradores (Rg);

(vi) fator de capacidade (Fc); e (vii) permanência a ser considerada no cálculo da potência instalada (p). Todos estes parâmetros devem ser definidos em porcentagem (%).

A avaliação do potencial energético é realizada com o suporte de um sistema computacional, que através de um sistema de informações geográficas acessa as bacias hidrográficas da área de concessão da CERJ, e utiliza um método de regionalização hidrológica para estimar as vazões que definem a produção hídrica da bacia. Para um curso de rio a ser analisado, através deste sistema computacional, são disponibilizados automaticamente as seguintes informações: (i) coordenadas dos pontos que definem o curso do rio, latitude $x(d)$, longitude $y(d)$ e altitude $z(d)$, em função da distância (d) ao longo do curso do rio; (ii) área de drenagem em função da distância ao longo do rio $A(d)$; (iii) área de alagamento em função da distância ao longo do rio e da altura da barragem: $Al(d,H)$; e (iv) vazão em função da área de drenagem e da permanência de vazões médias diárias $Q(A,p)$.

O método proposto tem como meta definir uma divisão de quedas no rio com o objetivo de maximizar a potência instalada em cada uma das usinas hidrelétricas instaladas no rio analisado.

O processo é iniciado a partir do ponto mais a jusante da bacia hidrográfica, onde será instalada a central de geração e cuja área de drenagem é igual a A_u . A partir deste ponto busca-se dimensionar a primeira usina, para a qual, considerando os limites especificados que definem uma pequena central hidrelétrica, consegue-se obter a maior potência instalada.

Através de um processo iterativo deve-se definir o ponto em que deverá ser realizada a captação de água por meio de um conduto forçado, ou seja, onde deverá ser instalada a barragem. No início do processo iterativo considera-se que a barragem encontra-se localizada junto à central de geração. As iterações são realizadas diminuindo-se gradualmente a área de drenagem da bacia hidrográfica, de um valor previamente fixado igual a ΔA .

Em cada posição do rio em que postula-se a localização de uma barragem, define-se a máxima altura possível da barragem (H_b), considerando-se as seguintes condições: (i) limitação física da bacia hidrográfica; (ii) verificação dos limites impostos pela ANEEL: $H_{min} \leq H_b \leq H_{max}$; e (iii) verificação dos limites de área alagada: $A_{min} \leq A_{lb} \leq A_{max}$, onde A_{lb} é a área de alagamento do local da barragem.

Tendo-se definido H_b , em função dos pontos do rio que estão sendo examinados para estabelecer a posição da central de geração e a localização da barragem, determina-se o valor da queda bruta $H_t(A_u, A_b)$, sendo A_u e A_b , as áreas de drenagem das bacias hidrográficas no local da central de geração e no local da barragem, respectivamente. Em função do local da barragem, estima-se a vazão que pode ser captada $Q(A_b, p)$. Com estes elementos determina-se o valor da potência instalada, usando-se a seguinte expressão:

$$Pi(Au, Ab) = \frac{C \cdot Q(Ab, p) \cdot Ht(Au, Ab)}{Fc} \quad (1)$$

onde $Pi(Au, Ab)$ é a potência instalada, em MW; $Q(Ab, P)$ é a vazão, em m³/s; $Ht(Au, Ab)$ é a queda bruta, em m; e a constante C é determinada por:

$$C = 0,0000009807Rg \cdot Rt \left(\frac{1 - Ip}{100} \right) \left(\frac{1 - If}{100} \right) \left(\frac{1 - Ph}{100} \right) \quad (2)$$

onde Rg é o rendimento dos geradores, em porcentagem; Rt é o rendimento das turbinas, em porcentagem; Ip é a indisponibilidade programada, em porcentagem; If é a indisponibilidade forçada, em porcentagem; e Ph representa as perdas hidráulicas, em porcentagem.

Na seqüência, verificam-se os limites para a potência instalada que são impostos pela ANEEL, executando-se os testes: (i) se $Pi(Au, Ab) < Pmin$, a usina hidrelétrica identificada por Au e Ab não é viável; redefine-se uma nova posição para Ab , fazendo-se igual a $Ab - \Delta A$, e aplica-se novamente o método descrito; (ii) se $Pi(Au, Ab) > Pmax$, a usina hidrelétrica identificada por Au e Ab não pode ser executada; deve-se retornar ao método reduzindo-se a altura da barragem, se nesta nova situação a usina é viável, redefine-se $Pi(Au, Ab)$, com a usina hidrelétrica no mesmo local; a redução da altura da barragem é realizada até que a usina torne-se viável, ou até que $Hb = Hmin$; caso a altura da barragem atinja o valor mínimo, sem verificar os limites da potência instalada, determina-se um novo local para a instalação da tomada de água, fazendo-se $Ab - \Delta A$, e aplica-se novamente o método descrito; e (iii) se $Pmin \leq Pi(Au, Ab) \leq Pmax$, deve-se registrar o local da posição da barragem como uma das possibilidades de solução sobre a definição da usina hidrelétrica; em seguida, prosseguem-se os cálculos, analisando-se uma nova posição para a barragem, fazendo $Ab - \Delta A$.

Quando a área de drenagem para um local de barragem, não satisfaz a condição $Ab > \Delta A$, o processo iterativo encerra-se.

Adota-se, para a instalação da usina, entre os locais selecionados, o ponto do rio com a barragem que apresentar máxima potência instalada, dentro dos limites descritos anteriormente. Em função do local da barragem e da altura da barragem, determina-se a área de drenagem Ar do ponto do início do reservatório, localizado a montante da barragem.

Quando $Ar > \Delta A$, reinicia-se o processo para definir uma nova usina hidrelétrica, fazendo-se Au aproximadamente maior que Ar . Considera-se, para efeitos de remanso, uma pequena área entre o início do reservatório e a casa de força da usina subsequente. Todo o método descrito anteriormente deve ser executado novamente.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de A. Arana, D. Félix e S. M. Maximiano, obtidas durante a elaboração deste trabalho.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. O. Galvão, "Controle de processos e sistemas de apoio à decisão," in *Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Sistemas Ambientais*, C. O. Galvão, e M. J. S. Valença, Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1999, pp. 225-246. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 7.)
- [2] I. Illich, e C. M. Krüger, "Projeto HG-70 - Métodos de regionalização para cálculo da evaporação líquida," CEHPAR, Curitiba, Relatório Técnico, 1992.
- [3] E. Kaviski, "Métodos de regionalização de eventos e parâmetros hidrológicos," Dissertação de Mestrado, UFPR, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, Curitiba: novembro, 1992.
- [4] E. Kaviski, I. Illich, e C. M. Krüger, "Projeto HG-68 - Regionalização de vazões em pequenas bacias hidrográficas no Estado de Santa Catarina: relatório final," CEHPAR, Curitiba, Relatório Técnico, 1991.
- [5] E. Kaviski, "Projeto HG-52 - Aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte: regionalização de curvas de permanência em pequenas bacias hidrográficas do Estado do Paraná. Volume III," CEHPAR, Curitiba, Relatório Técnico, 1986.
- [6] C. M. Krüger, e E. Kaviski, "Projeto HG-77 - Regionalização de vazões em pequenas bacias hidrográficas do Estado do Paraná: relatório n. 1 - Dados e parâmetros básicos," CEHPAR, Curitiba, Relatório Técnico, 1994.