

ESTUDO DO IMPACTO DE GERAÇÃO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL POR MEIO DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

Raquel Ayumi Aita¹
Daniel Henrique Marco Detzel¹
Marcelo Bessa¹

¹Universidade Federal do Paraná

DOI: 10.47168/rbe.v28i4.769

RESUMO

O despacho hidrotérmico das usinas do Sistema Interligado Nacional é influenciado por uma imensa quantidade de parâmetros e variáveis. Visando otimizar a geração, frequentemente questiona-se quais usinas mais impactam o resultado, e quais as consequências causadas por determinadas simplificações do problema. Propondo a Análise de Componentes Principais como metodologia de estudo, este trabalho busca mensurar o peso de cada usina hidrelétrica (UHE) com capacidade de regularização intramensal, acrescidas das UHE Itaipu e UHE Belo Monte, na geração hidrelétrica otimizada resultante do Modelo LYNX. A aplicação do método obteve uma explicação de cerca de 90% da variância total pelas cinco primeiras componentes principais. Notavelmente, o contraste entre a análise feita sem as UHEs Belo Monte e Itaipu com as que estão inclusas ressalta o impacto que elas possuem frente as outras usinas do sistema. Ao final, foi possível concluir que as UHEs Belo Monte, Tucuruí e Itaipu apresentaram os maiores impactos na variância da geração final, nesta ordem.

Palavras-chave: Planejamento energético; Análise de Componentes Principais; Geração hidrelétrica; Despacho hidrotérmico.

ABSTRACT

The hydrothermal dispatch of power plants in the Brazilian National Interconnected System is affected by an immense number of parameters and variables. Aiming to optimize the energy generation, it is often questioned which hydropower plants impact the result the most, and what are the consequences triggered by certain simplifications of the problem. Proposing the Principal Component Analysis as method of research, this study seeks to measure the weight of each hydroelectric power plant (HPP) with intra-monthly regularization capacity, plus Itaipu

HPP and Belo Monte HPP, in the optimized hydroelectric generation resulting from the LYNX Model. The method estimated that about 90% of the total variance is explained by the first five principal components. Notably, the contrast between the analysis done without Belo Monte and Itaipu with the one that they are included highlights their impact against the other hydropower plants in the system. In the end, it was possible to conclude that the Belo Monte, Tucuruí and Itaipu HPPs had the greatest impacts on the final generation variance, in that order.

Keywords: Energy planning; Principal Component Analysis; Hydroelectric generation; Hydrothermal dispatch.

1. INTRODUÇÃO

O planejamento energético a nível nacional é objeto de pesquisa e estudo há décadas, devido a grande complexidade inerente ao problema, em número de variáveis significativas, tamanho e diversidade do parque hidrelétrico brasileiro. Uma vez que as usinas hidrelétricas (UHEs) são despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), uma questão é repetidamente trazida à tona: como assegurar o atendimento da demanda, minimizando os custos do processo?

Assim, uma das alternativas na busca pela resposta é a simplificação do problema por meio da redução da dimensionalidade. Historicamente, esta foi uma opção muito utilizada, motivada por dois pontos: primeiro, a limitação computacional de processamento dos computadores; segundo, complementarmente ao ponto anterior, a inexistência de métodos que permitam a resolução do problema de forma analítica. Até hoje, o ONS resolve o despacho hidrotérmico brasileiro por meio de uma simplificação do parque de usinas hidrelétricas como reservatórios equivalentes, cada um acumulando informações de um dos subsistemas brasileiros (Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte) (ONS, 2022).

Contudo, a proposta da simplificação do sistema também traz seus problemas. Além dos erros inerentes às hipóteses, há também a dúvida sobre o que priorizar na otimização. Uma vez que a previsão de vazões é incerta para horizontes de médio e longo termo (DETZEL et al., 2016), é impossível desvincular um dado despacho a um risco de desabastecimento, ou, analogamente, a um custo de operação. O tópico ganha cada vez mais importância conforme o tempo passa, pois sabe-se que a demanda tem crescido drasticamente nos últimos anos, sem um crescimento correspondente da capacidade de regularização do sistema (BERTONE et al., 2019; FALCETTA, 2015). Assim, questiona-se: qual deve ser a priorização dentro das usinas existentes no parque brasileiro?

Este estudo se insere nesta problemática e tem por objetivo identificar quais UHEs são responsáveis pela maior parcela da variância na energia hidrelétrica gerada no sistema, isto é, aquelas com a maior capacidade de impacto na variabilidade do desempenho do Sistema Interligado Nacional (SIN). Assim, propõe-se o uso da Análise de Componentes Principais (PCA) sobre o conjunto de geração hidrelétrica composto por usinas com reservatório de regularização, dentro do horizonte de planejamento do sistema de 60 meses à frente. Com o fim de retirar a influência das decisões operativas e manter apenas o impacto das características invariantes do problema, estas são removidas do resultado do modelo de otimização LYNX.

A apresentação do estudo se divide então em quatro partes, sendo esta introdução a primeira delas. A segunda seção apresenta os materiais e métodos utilizados na análise, descrevendo brevemente o modelo LYNX e a proposta de estudo do trabalho. Os resultados obtidos para os casos aferidos são discutidos na sequência, e, por fim, apresentam-se as considerações finais do trabalho, onde também se propõe refinamentos ao estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o estudo proposto, este trabalho utiliza a saída de Geração Hidrelétrica (GH) otimizada do Modelo LYNX como dado de entrada na análise, feita por meio da Análise de Componentes Principais (PCA). Os resultados apresentados neste artigo seguem duas premissas importantes. A primeira é que as séries submetidas ao teste estatístico são em escala anual. A razão para essa escolha é que o que se investiga aqui são eventuais tendências advindas de fenômenos de grande escala. Além disso, a sazonalidade é um fator que não é levado em consideração pelo método proposto. A segunda premissa é que o nível de significância considerado é de 5%. Assim sendo, p-valores inferiores a esse percentual indicam não estacionariedade.

2.1 Modelo LYNX

O LYNX é um modelo de otimização do despacho hidrotérmico aplicado a usinas individualizadas e que considera uma abordagem estocástica não linear implícita. A função objetivo está estruturada de modo a minimizar os custos de geração térmica e eventuais déficits de energia para diferentes níveis de risco. Séries sintéticas de vazões afluentes às UHEs são geradas por meio de um modelo multivariado autorregressivo de médias móveis contemporâneo, com subsequente amostragem não equiprovável para a redução da dimensão do problema (INSTITUTOS LACTEC, 2019).

No presente estudo, o LYNX considera 200 cenários sintéticos

e risco de desabastecimento mínimo, sendo também configurado para otimizar o despacho hidrotérmico considerando séries históricas organizadas em janelas móveis de 60 meses de duração.

A escolha do uso da GH otimizada no lugar da GH histórica das usinas do sistema se dá em busca da eliminação da influência do operador, tornando assim a análise subsequente baseada puramente nos aspectos físicos e hidrológicos das UHEs, e não das decisões tomadas em sua operação.

2.2 Análise de Componentes Principais (PCA)

A PCA é um método estatístico multivariado que data de 1901, elaborado por Karl Pearson. Sua proposta é buscar, dentro de uma coleção de variáveis em análise, quais explicam a maior parcela da variação do conjunto como um todo. Para o problema deste trabalho, especificamente, investiga-se quais UHEs causam maior impacto na produção otimizada do SIN.

Manly (2019) aponta que o método possui maiores chances de apresentar resultados satisfatórios quando as variáveis de entrada estão altamente correlacionadas, o que se sabe ser o caso da análise em questão. Assim, considera-se o seguinte problema: seja o conjunto de dados em análise, composto pela geração hidrelétrica (GH) otimizada das usinas em estudo – GH_1, GH_2, \dots, GH_n – ao longo de 60 meses. A interpretação de tal resultado é complexa, pois envolve a análise de n séries diferentes, uma para cada UHE. Estatisticamente, pode-se dizer que, devido ao fato de a matriz de covariância não ser esparsa, isto é, dos dados estarem correlacionados entre si, há informações em redundância, o que complica a mensuração da importância de cada uma das séries frente às demais.

Baseando-se então na teoria da Álgebra Linear, o método se propõe a reescrever o sistema analisado, apresentando não mais as GHs por usina, e sim por combinações entre elas. Essas novas séries, por sua vez, permitem uma interpretação mais direta do conjunto. Coloquialmente, pode-se dizer que a ACP muda o ponto de vista do problema, simplificando a visualização dos resultados.

A formalização do método se dá da seguinte forma: dada a matriz de covariância (C), calculada para as n séries de GH, correspondentes a cada uma das UHEs e ordenadas em coluna na matriz A , fatora-se:

$$C = PDP^T \quad (1)$$

onde a matriz P , construída por meio dos autovetores de C , dispostos

em coluna, permite reescrever os dados iniciais como:

$$B = AP \quad (2)$$

As colunas de B são chamadas de Componentes Principais (CPs), e estão associadas aos valores da diagonal da matriz D , que são as variâncias relativas a cada uma das CPs. Sendo esta uma decomposição por autovetores, as colunas de B não estão mais correlacionadas entre si, visto que a nova matriz de covariância (D) é diagonal e concentra as variâncias máximas possíveis, assim otimizando a análise a um menor número de componentes (STRANG, 2005).

Portanto, a proposta do método é realizar o descarte de parte das novas variáveis, visto que uma pequena parcela delas já concentra a maior parte da variância do conjunto. A escolha da quantidade de variáveis a se manter foi feita com a análise do *scree plot* da PCA.

Contudo, um problema pode surgir ao realizar a troca do sistema de referência do conjunto. Suas GHs, anteriormente associadas apenas a uma usina, são combinadas entre si, de forma que cada CP e variância está associada à várias usinas simultaneamente. Desta forma, uma grande variância expressa pela primeira CP não equivale diretamente a uma das variáveis originais em estudo. Todavia, notavelmente para este caso, foi possível identificar as usinas de maior impacto através da interpretação direta dos vetores obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos em duas etapas: na primeira, aplicou-se a PCA no conjunto de GHs das usinas com capacidade de regularização, e, posteriormente, acrescentou-se UHE Belo Monte e UHE Itaipu ao caso anterior. Desta forma, pretende-se mensurar o impacto destas na variância total e a diferença de interpretação quando desconsideradas da análise. Ambas as aferições foram realizadas com o mesmo *deck* de resultados do LYNX, e implementadas na linguagem de programação Python. Ressalta-se que é particularmente importante que o estudo seja feito nesta ordem (com a retirada das usinas a fio d'água após a otimização do sistema), pois, caso contrário, a GH otimizada não seria verossímil frente ao parque real de UHEs. A investigação foi então realizada repetidamente com os resultados da otimização de cada um dos 200 cenários sintéticos.

A determinação do número de CPs a serem descartadas indica que, em geral, as cinco primeiras acumulam em torno de 90% da variância do conjunto. Este número foi então padronizado para todas as análises. A Figura 1 apresenta um dos *scree plots* obtidos, que mostra um decaimento mais suave a partir da quinta componente.

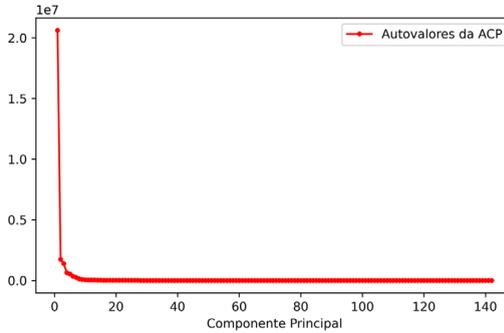


Figura 1 – Scree plot da análise de componentes principais para um dos cenários analisados

O resultado da PCA aplicada a um dos cenários sintéticos é apresentado na Figura 2. Neste gráfico de barras acumulado, é exibido o peso de cada UHE com reservatório de acumulação, em cada uma das cinco primeiras CPs. A legenda mostra a magnitude relativa de cada uma destas em termos de porcentagem da variância total do conjunto. O mesmo resultado foi obtido para os outros 199 casos, que apresentaram forma e valores semelhantes. As medidas no eixo x foram omitidas por questão de clareza, visto que tais números não possuem significado quando vistos individualmente, ao invés de forma comparativa.

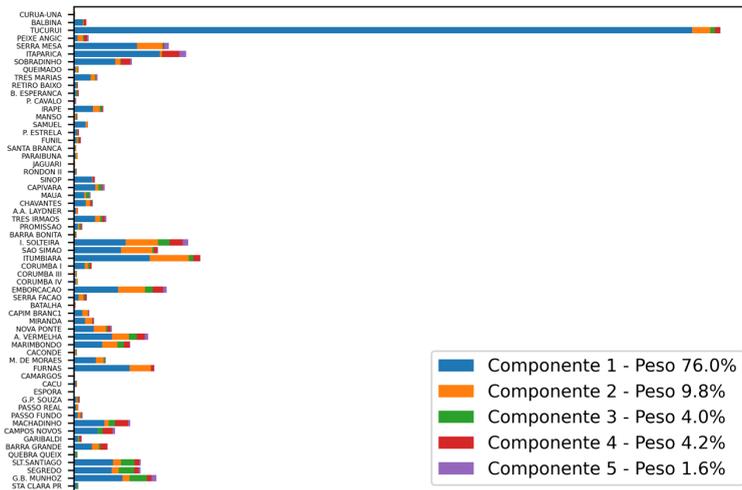


Figura 2 – Impacto de cada UHEs com reservatório na variância total do conjunto analisado

A figura deve ser interpretada da seguinte forma: a componente de GH que acumula 76% da variância do conjunto é resultado de uma combinação ponderada entre todas as usinas, sendo exibida em cada barra a magnitude da contribuição de cada UHE. Esse valor também foi ponderado pelo peso de cada CP. O mesmo pode ser interpretado para cada uma das outras quatro componentes. Por fim, o tamanho total da barra pode ser então compreendido como um estimador do impacto de uma usina em relação as outras. Ressalta-se, contudo, que esta soma deve ser considerada cautelosamente, uma vez que agrega coeficientes ponderados relativos a componentes distintas.

Com a introdução da UHE Belo Monte e UHE Itaipu, a comparação entre o gráfico anterior e o apresentado na Figura 3 permite observar o efeito causado pela retirada destas na consideração global. O peso da UHE Belo Monte ultrapassa o da UHE Tucuruí, ainda que esta apareça com relativa magnitude na maior CP. A UHE Itaipu também apresenta contribuição, porém inferior as duas supracitadas. As outras usinas, por sua vez, contribuem com um peso menor que o anterior. Notoriamente, a UHE Tucuruí é responsável por grande parte da variação no sistema em ambas as considerações.

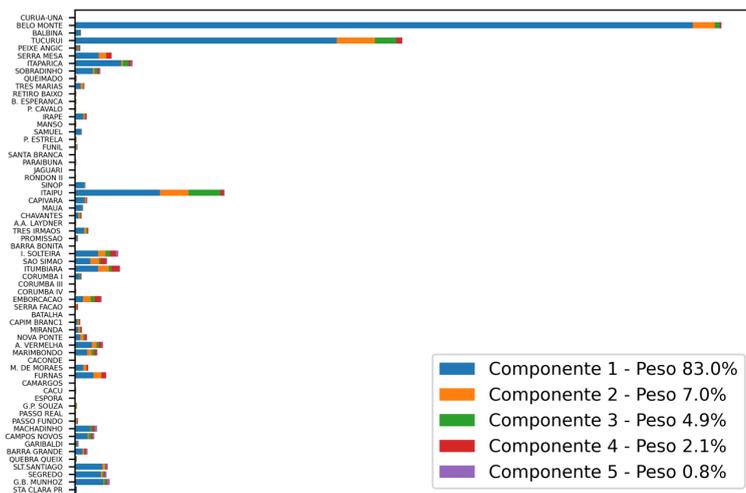


Figura 3 – Impacto de cada UHEs com reservatório (+ UHE Belo Monte e UHE Itaipu) na variância total do conjunto analisado

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O problema do despacho envolve, invariavelmente, modelos de otimização e hipóteses simplificadoras em sua resolução. Particularmente, processo de otimização agrega as características físicas e hidrológicas de cada usina do parque para a tomada de decisão. A aplicação do método no resultado permitiu mensurar o impacto de cada UHE nesta que é a solução ótima. Desta forma, as variáveis que influenciam o desempenho de uma usina são agregadas ao resultado, o que permitiu revelar o peso de cada usina como combinação destes fatores, e não separadamente por sua capacidade de geração, acumulação ou hidrologia.

Assim, observou-se que UHE Belo Monte e UHE Tucuruí acumulam boa parte da variância do sistema, sendo estratégicas ao operador. Mesmo não possuindo reservatório de acumulação, Belo Monte e Itaipu agregam boa parcela de variabilidade ao sistema, visto que a cascata de usinas à montante age em função delas, resultado da otimização do Modelo LYNX considerando-se reservatórios descentralizados.

Estudos em andamento buscam explorar características em comum nas usinas que apareceram com destaque na componente de maior peso. A análise também será aplicada na investigação da variância sazonal da energia gerada por empreendimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTONE, A. C.; BUENO, M. L.; KEPPEM, R. P.; DETZEL, D. H. M. Accumulation and run-of-the-river hydropower plants: a case study of the Brazilian hydroenergetic system. In: Proceedings of the 38th IAHR World Congress. Panamá City, 2019.

DETZEL, D. H. M.; MEDEIROS, L.; OENING, A. P.; MARCILIO, D. C.; TOSHIOKA, F. Acerca da quantidade de simulações estocásticas de vazão no contexto do planejamento energético. In: Revista Brasileira de Energia v.22.2 (2016), pp. 21–32.

FALCETTA, F. A. M. Evolução da capacidade de regularização do Sistema Elétrico Brasileiro. 2015. 65 p. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. 2015.

INSTITUTOS LACTEC. Projeto PD 6491-0307/2013 - Projeto LYNX - Otimização em larga escala aplicada ao despacho hidrotérmico brasileiro: modelos hierárquicos de operação e planejamento em médio e curto prazos com integração de energia e potência: Relatório Técnico ANUAL - Dez/2017 -Nov/2018. Curitiba: 2019.

MANLY, B. F. J.; ALBERTO, J. A. N. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). O que é o ONS? Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em: 5 jun. 2022.

STRANG, G. Linear algebra and its applications. 4th ed. Cengage Learning, 2005.