

Correlation Between Precipitation Index and Energy Generation in Hydroelectric Plants

Gabriel L. L. Sousa, Marcio F. D. Campos, and Maury M. Gouvêa Jr

Abstract—A recent water crisis that befell over several states in Brazil negatively affected hydroelectric plants' energy production once rainfall regime exerts a major influence in predominantly hydraulic power systems. This paper analyses the correlation between power generation and data collected from tributary flow, reservoir level, standardized precipitation index (SPI) on hydroelectric plants located in the São Francisco river basin. The analysis is performed by Pearson's Coefficient of Correlation, for a period of 28 years that includes the dry season, and for the dry season separately. The results showed weak and moderate correlation coefficients between SPI and generation for both analyzed periods with slightly higher correlations in the last years when a decrease in power generation is observed. The correlations found between the affluent flow, reservoir level, and the generation were influenced by the reservoir characteristics, and were slightly higher than those of the dry periods.

Index Terms—Hydroelectric plant, Pearson Correlation, Precipitation index, Water crisis.

I. INTRODUÇÃO

A crise hídrica ocorrida no Sudeste do Brasil no biênio 2014/2015 provocou uma acentuada diminuição no nível dos reservatórios da região [1]. Sendo a Região Sudeste a mais populosa do país, faz-se necessário avaliar o impacto do baixo índice de precipitação na geração de energia elétrica e qualificar a flexibilidade e confiabilidade desse sistema de geração frente às mudanças no regime de chuvas.

Uma vez que as usinas hidrelétricas correspondem a 70% da capacidade instalada de energia elétrica do Brasil, a geração de energia está sujeita às flutuações do regime de chuvas [2]. O volume de precipitação tem influência direta no escoamento superficial de rios e, conseqüentemente, no nível e vazão de reservatórios [3]. Levando em consideração o seu princípio de funcionamento, é natural que a produção de energia das usinas hidrelétricas seja afetada pela redução da oferta de água. Sendo assim, frente aos menores índices de chuva presentes em vários estados brasileiros nos últimos anos, muitas hidrelétricas reduziram sua produção.

O Índice Padronizado de Precipitação (IPP) é um índice poderoso, flexível e de cálculo simples para caracterizar a precipitação de uma região em diferentes escalas de tempo.

Definir a correlação entre o IPP e a geração de usinas hidrelétricas em uma região permite que se implante um planejamento mais efetivo para lidar com eventos de baixa disponibilidade de geração de energia pelo princípio hidráulico. Desta

maneira, é possível avaliar com mais clareza até que ponto é possível contar com a geração de hidrelétricas e qual a necessidade de desenvolver uma nova política de expansão energética investindo em novas tecnologias.

O objetivo deste trabalho é estabelecer a correlação entre a geração de energia elétrica em usinas hidrelétricas localizadas na bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais e o Índice Padronizado de Precipitação (IPP), juntamente com as demais variáveis influenciadas por ele, nas regiões onde estas usinas estão instaladas. Para isso, obteve-se dados de geração de usinas hidrelétricas presentes na Bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais. Em seguida, analisou-se dados de chuva para obter seu IPP, para intervalos predefinidos de tempo nas cidades onde as usinas selecionadas estão localizadas. O método proposto obteve a correlação entre o IPP calculado e a geração das usinas hidrelétricas da região utilizando o método de Pearson. Também obteve-se a correlação entre a geração de energia elétrica e os registros históricos de nível à montante e de vazão natural afluente das usinas selecionadas.

Este trabalho está organizado como segue. A Seção II apresenta conceitos fundamentais da hidrologia aplicada às usinas hidrelétricas. A Seção III expõe os métodos utilizados para a análise proposta neste trabalho. A Seção IV disserta sobre os resultados e discussões dos levantamentos hidrológicos feitos nas usinas hidrelétricas. A Seção V apresenta a conclusão do trabalho e propostas para realização de estudos futuros.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é a sequência de fenômenos físicos pelo qual a água passa ao evaporar dos locais onde se encontra acumulada na superfície terrestre, precipitar na forma de chuva, neve ou gelo, escoar pela superfície, infiltrar no subsolo, escoando em parte nos aquíferos ou sendo absorvida pelas raízes de plantas e então retornando novamente à atmosfera por processos como a transpiração ou evaporação direta [4].

Quanto maior a variação do ciclo hidrológico em uma região, menor é a oferta de recursos hídricos naturais. Assim, para garantir a transferência de água entre diferentes locais ou seu armazenamento entre períodos chuvosos para períodos secos, foram desenvolvidos métodos para manipular partes do ciclo hidrológico como, por exemplo, obras de captação de água em cursos superficiais ou subterrâneos [5].

A hidrologia é, portanto, de essencial interesse para a engenharia no planejamento, projeto e operação de estruturas que objetivam atenuar as conseqüências do excesso ou escassez de água ou utilizá-la como recurso, como é o caso

Gabriel L. L. Sousa foi aluno do curso de Engenharia Elétrica da PUC Minas, *campus* Contagem, Brasil.

Marcio F. D. Campos é professor e pesquisador do curso de Engenharia Elétrica da PUC Minas, *campus* Contagem, Brasil.

Maury Gouvêa é professor e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC Minas, Belo Horizonte, Brasil.

dos reservatórios. O aproveitamento dos recursos hídricos para atividades como a geração de energia elétrica exige a quantificação de diversas variáveis do ciclo hidrológico de forma a se obter a vazão de um curso d'água para a aplicação do projeto das estruturas hidráulicas constituintes [4].

O ciclo hidrológico influencia diretamente a operação de reservatórios que podem ser construídos e operados para servir a dois usos conflitantes: geração de energia e controle de cheias [6]. O regime de operação dos reservatórios varia de acordo com a demanda individual por água, não sendo possível generalizar um modelo de vazões defluentes que enquadre a todos [7]. Assim, o conhecimento do ciclo hidrológico, juntamente com a eficácia de modelos de previsão de vazão afluente, são essenciais para garantir uma operação otimizada de reservatórios de acordo com as suas funções.

B. Índice Padronizado de Precipitação

O Índice de Precipitação Padronizada (IPP ou SPI - Standardized Precipitation Index) indica o regime de chuva padronizada de uma função de distribuição de probabilidades de uma precipitação e tem capacidade de quantificar o excesso ou déficit de chuvas em uma determinada região. Foi desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist [8] e obteve grande importância nos últimos anos uma vez que não é apenas um potencial indicador de períodos de secas e chuvas mas, também, permite comparações de seus valores ao longo do tempo e espaço. Pode ser aplicado para uma região que tenha dados históricos mensais de pelo menos 30 anos [9].

O IPP corresponde a um número de desvios-padrão em que a precipitação acumulada medida se afasta da média de precipitação para uma determinada região [10]. Os valores do IPP são expressos com um desvio padrão de valor positivo, para o caso de excesso de chuvas e, negativo, em caso de períodos de seca. McKee et al. [8] faz uso do sistema de classificação do IPP mostrado na Tabela I.

TABELA I
INTERPRETAÇÃO DOS VALORES DO IPP

2,0 ou mais	Extremamente úmido
1,5 a 1,99	Muito úmido
1,0 a 1,49	Moderadamente úmido
-0,99 a 0,99	Aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2 ou menos	Extremamente seco

O IPP pode ser calculado para diferentes escalas de tempo [10], sendo que o IPP-1 corresponde à precipitação mensal, o IPP-3 corresponde à precipitação em um período de 3 meses, e assim por diante, como ilustra a Tabela II [9].

Outro índice frequentemente utilizado na quantificação do regime de chuvas para uma região é o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI). Este faz uso de dados de precipitação e temperatura em um modelo simplificado de balanço hídrico, considerando, portanto, os eventos naturais que proveem e os que absorvem água [11].

Entretanto, o IPP é geralmente vantajoso em relação ao PDSI, pois faz uso apenas dos dados de precipitação, podendo caracterizar eventos de seca ou condições anormais de

TABELA II
EMPREGO DAS ESCALAS DE TEMPO

Escala (mês)	Cálculo	Aplicação
1	Precipitação de um período de um mês X precipitação para este mesmo período da série histórica.	Determinar os eventos meteorológicos de seca, umidade do solo em curto prazo e estresse em colheitas, especialmente na temporada de crescimento.
3	Precipitação em um período de 03 meses X precipitação para este mesmo período da série histórica.	Determinar condições de umidade em regiões agrícolas.
6	Precipitação em um período de 06 meses X precipitação para este mesmo período da série histórica.	Comparar o índice de precipitação em diferentes estações; determinar vazões anômalas e fluxos de reservatórios.
...

clima em diferentes escalas de tempo, permitindo uma melhor comparação entre regiões com diferentes tipos de clima, além do seu cálculo ser menos complexo [12].

C. Dados Históricos de Precipitação e Consistência de Dados

Para a hidrologia a precipitação compreende toda a forma de água originada do meio atmosférico que alcança a superfície terrestre, na forma de chuva, granizo, neve, orvalho, etc, sendo a chuva a mais importante devido à sua capacidade de produzir escoamento [13].

Uma vez que a parcela de chuva que atinge o solo gera o escoamento nas vertentes de uma bacia hidrográfica, a estimativa da intensidade e volume de precipitação em uma determinada bacia hidrográfica permite auxiliar no planejamento e gestão de recursos hídricos, avaliar a operação de hidroelétricas e otimizar a geração de energia elétrica nessas usinas [14].

Com o objetivo de caracterizar o regime de chuvas em uma região, são instalados postos pluviométricos para se obter um registro histórico de dados de chuvas ao longo dos anos. Embora os estudos hidrológicos exijam séries contínuas de dados, uma série com 30 anos de observações mensais contínuas e pelo menos 85% de dados completos já oferece uma boa estimativa para o cálculo do IPP [9].

D. Tipos de Usinas Hidrelétricas

As usinas hidrelétricas podem ser classificadas em razão do tipo de sua operação em usinas a fio d'água, que são usinas sem reservatório de regularização ou que possuem reservatório pequeno quando comparado à vazão do rio, com capacidade de regularização apenas em caráter diário ou semanal, e usinas com reservatório, que são aquelas que possuem um reservatório de regularização, cujos níveis variam bastante de acordo com os períodos de cheias ou de seca [15].

A partir de 1990 as usinas com reservatório de regularização tiveram seu uso reduzido devido a restrições ambientais, uma vez que exigem reservatórios maiores e, consequentemente, causam maiores impactos ambientais durante a sua implementação [15]. Entretanto, reservatórios são indispensáveis para o gerenciamento de riscos associados a eventos

hidrológicos extremos e para o armazenamento de água e energia durante períodos de baixa disponibilidade hídrica.

Devido à sazonalidade das precipitações e vazões, é empregada a combinação de hidrelétricas com reservatórios de acumulação. Esses reservatórios acumulam água durante a estação chuvosa e permitem, ao liberar essa água, a manutenção da vazão turbinada nos períodos de baixa vazão afluente [16]. Assim, a disposição de hidrelétricas com reservatórios e a fio d'água em cascata ao longo de uma bacia hidrográfica permite uma geração aproximadamente constante de energia ao longo do tempo.

E. Método de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis [17]. Estatisticamente, duas variáveis estão associadas quando há semelhança na distribuição de seus escores, podendo associar tanto quanto à distribuição de frequências quanto pelo compartilhamento de variância. Já o conceito de linearidade indica que um incremento de valor em uma variável X produz um incremento proporcional de valor em uma variável Y , o que equivaleria a uma linha reta em uma representação gráfica.

O valor retornado pelo coeficiente de Pearson varia de -1 a 1, sendo que o sinal indica o direcionamento positivo ou negativo do grau de relacionamento e o módulo indica a intensidade desta relação. Caso este coeficiente retorne um de seus extremos (-1 e 1), é possível afirmar qual é o escore de uma variável ao se conhecer o escore de outra. Por outro lado, um valor de coeficiente igual a 0 indica que não há relação linear entre as variáveis.

Valores extremos do coeficiente de Pearson dificilmente são encontrados na prática, por isso é necessário caracterizar o significado de valores intermediários. A interpretação proposta por Filho e Junior [17], define que valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Dancy e Reidy, citados pelos mesmos autores, apontam para uma classificação ligeiramente diferente: $r = 0,10$ até 0,30 (fraco); $r = 0,40$ até 0,6 (moderado); $r = 0,70$ até 1 (forte). O mais relevante é entender que quanto mais próximo de 1 é o módulo do coeficiente, maior o grau de dependência das variáveis e quanto mais próximo de 0, menor é o grau dessa dependência. Quanto ao sinal, o negativo indica uma variação inversa para as variáveis e, o positivo, que os valores das variáveis aumentam ou diminuem simultaneamente.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram escolhidas para a análise as usinas de Cajuru, Gafanhoto, Queimado, Rio de Pedras e Três Marias, localizadas no Rio São Francisco, em Minas Gerais. A Tabela III mostra as principais características destas usinas e, a Fig. 1, o fluxograma do método proposto.

Para as usinas escolhidas, foram selecionados para análise os dados de nível à montante, vazão e geração, fornecidos pela concessionária responsável por sua operação. Os dados de chuva utilizados para o cálculo do IPP, por sua vez,

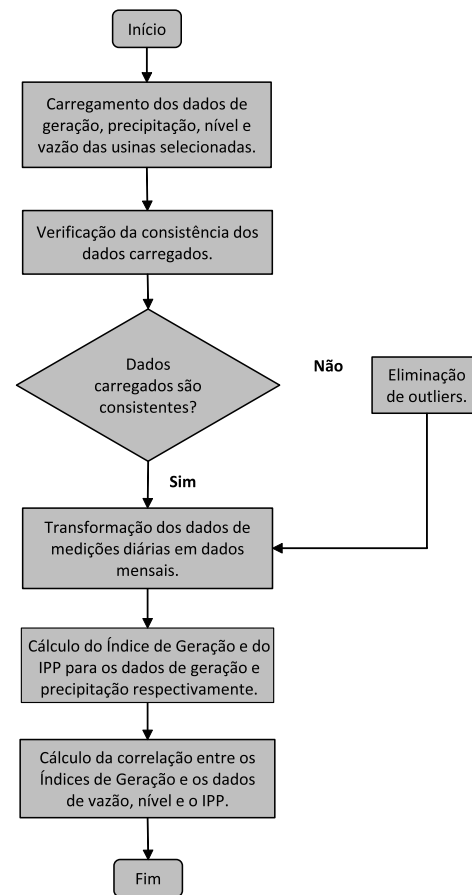


Fig. 1. Fluxograma do método proposto

foram obtidos no repositório HidroWeb mantido pela Agencia Nacional de Águas (ANA). Dentre as estações meteorológicas disponíveis no site foi selecionada, para cada cidade onde as usinas estão localizadas, a estação meteorológica com o maior período de registros e menor número de falhas.

A análise foi realizada usando a linguagem de programação R e o ambiente R Studio. Para o cálculo do IPP foi utilizado o pacote externo *precintcon* [18] que contém funções para analisar a intensidade, concentração e anomalia das precipitações. Foi utilizado também os pacotes externos *zoo* [19] e *lubridate* [20] que contém funções para facilitar o trabalho com a manipulação de datas e intervalos de tempo.

A. Carregamento dos Dados

Foi tomado como referência os dados de geração que possuíam registros máximos para o período de janeiro de 1990 até dezembro de 2017; os dados de nível e vazão foram recortados para o mesmo período. Exceto para a usina de Três Marias, os dados de nível e vazão das demais usinas foram disponibilizados com início de registro posterior a janeiro de 1990. Já os dados históricos de chuva originais de cada estação foram recortados para o período de janeiro de 1985 até dezembro de 2017, totalizando 33 anos de registros mensais. Foram selecionadas apenas estações que possuíam o número mínimo de anos de registro igual ao período de recorte.

TABELA III
DADOS DAS USINAS SELECIONADAS

Usina	Localização	Classe	Pot. Instalada (MW)	Alt. da Barragem (m)	Vol. da Barragem (hm ³)	Garantia. Física (MW-médios)
Cajuru	Divinópolis	PCH	7,20	22	192,70	2,69
Gafanhoto	Divinópolis	PCH	14,00	8	4,32	6,68
Queimado	Unai	UHE	105,00	70	477,98	58,00
Rio de Pedras	Itabirito	PCH	9,28	32	6,04	2,15
Três Marias	Três Marias	UHE	396,00	75	19.528,00	239,00

B. Análise Exploratória dos Dados

Os dados de nível foram plotados e a análise do gráfico possibilitou a detecção de diversos outliers, pontos que, pela própria natureza das variáveis, configuram registros inconsistentes. Para cada série foi determinado o valor máximo e mínimo dos registros consistentes e os valores fora dessa faixa foram retirados. A comparação dos gráficos de nível da Usina Rio de Pedras, antes e após a retirada desses registros, pode ser vista nas Fig. 2 e 3.

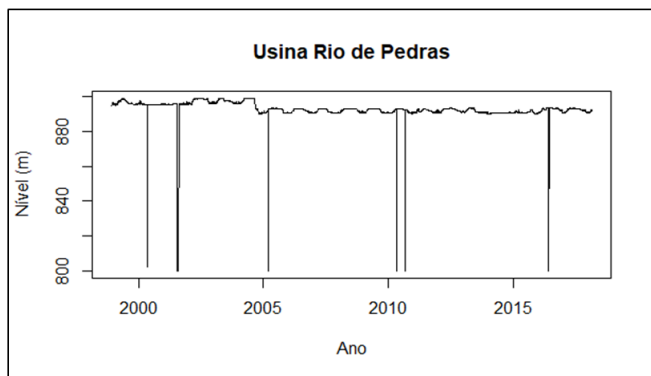


Fig. 2. Nível da Usina Rio de Pedras anterior à eliminação dos outliers

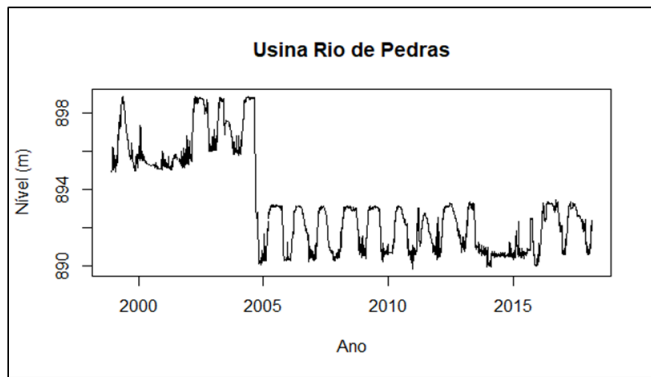


Fig. 3. Nível da Usina Rio de Pedras após a eliminação dos outliers

O gráfico de vazão permitiu a visualização de registros nulos e também negativos. Uma vez que registros dessa natureza são incompatíveis com a realidade, tais dados também foram eliminados da série histórica. Uma comparação dos gráficos de vazão da Usina de Queimado, antes e após a retirada destes dados inconsistentes, pode ser vista nas Fig. 4 e 5.

Para os dados de chuvas, calculou-se o percentual de falhas nos registros mensais para cada estação, cujos resultados são mostrados na Fig. 6. A análise do percentual indicou resultados

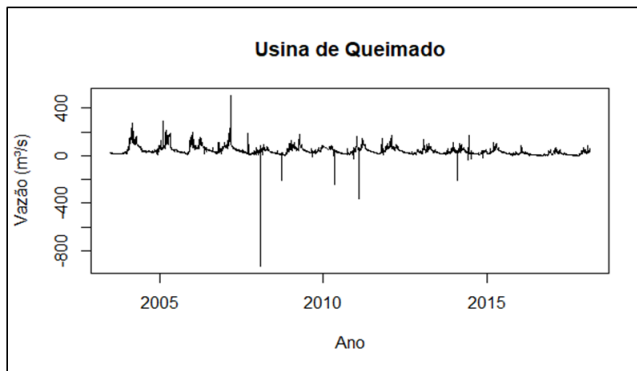


Fig. 4. Vazão da Usina de Queimado anterior à eliminação dos outliers

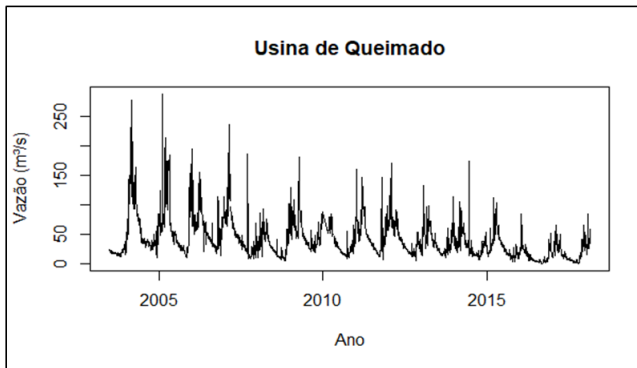


Fig. 5. Vazão da Usina de Queimado após à eliminação dos outliers

satisfatórios uma vez que o máximo encontrado foi de 4,55%, abaixo do máximo de 15% aceitável para o cálculo do IPP.

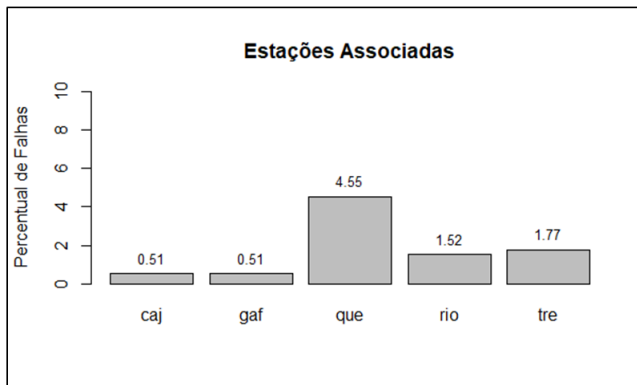


Fig. 6. Percentual de falhas das estações

C. Ajuste dos Dados e Cálculo do IPP

Uma vez recortados, os dados de vazão e nível a montante foram convertidos em dados mensais através do cálculo da média de cada mês contido no registro. Já os dados de geração, disponibilizados originalmente em registros mensais, foram convertidos em um índice de geração. O método adotado para obter este índice de geração, descrito em Silva et al. [21], consiste no cálculo da razão entre a energia gerada em cada mês e a garantia física do empreendimento.

Os dados históricos de nível e vazão foram fornecidos em registros diários e convertidos em registros mensais com o auxílio da biblioteca *zoo* já incorporada ao ambiente R. Para realizar a conversão foi calculada a média mensal de cada registro para o intervalo de tempo definido.

Os IPPs foram calculados para o período de 33 anos, entre janeiro de 1985 até dezembro de 2017. O cálculo foi realizado em escalar de tempo de nove, 12 e 24 meses dado que escalas de tempo maiores estão mais relacionadas à vazão de cursos d'água e níveis de reservatórios [9]. Uma vez realizado o cálculo, todos os dados dos IPPs foram recortados para o mesmo intervalo de tempo dos dados anteriores.

D. Correlação entre os Dados

A correlação foi calculada utilizando o Coeficiente de Correlação de Pearson, considerando duas variáveis por vez. Na ausência de algum registro entre as duas variáveis correlacionadas em uma mesma data, o cálculo da correlação passa imediatamente para o próximo par de registros completos. Ao final do cálculo foram gerados gráficos em barras para os índices de correlação encontrados entre cada par de variáveis para todas as usinas.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Correlações para Todo o Período de Registro

A primeira análise de correlação entre os dados foi feita para todo o período de registros disponível. Para a correlação entre o nível do reservatório e a geração, como mostra a Fig. 7, o único empreendimento que apresenta correlação insignificante é a usina de Gafanhoto. Essa usina é a que apresenta a menor altura máxima da barragem e menor volume de reservatório. Em seguida temos as usinas de Cajuru e Rio de Pedras, com coeficientes de correlação fracos de 0,137 e 0,169 respectivamente. A usina de Queimado possui um índice de correlação moderado de 0,432 sendo a usina com o segundo maior volume de reservatório e segunda maior altura da barragem. A usina de Três Marias possui o maior índice de correlação entre o reservatório e a geração com valor de 0,698, o que pode ser considerado um coeficiente de correlação forte, posto que, conforme classificação de Dancey e Reidy [17], o coeficiente de correlação é considerado forte a partir de 0,7.

A análise da correlação entre a vazão e a geração permite verificar uma reversão nos coeficientes para as usinas de Gafanhoto e Três Marias, como mostra a Fig. 8.

Enquanto Gafanhoto não apresentou correlação entre o nível e geração, para a correlação entre vazão e geração o coeficiente desta usina foi o maior, apresentando um coeficiente de correlação alto (0,752). Uma possível explicação é

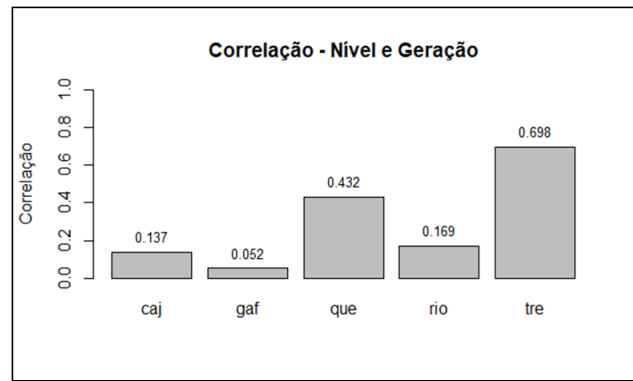


Fig. 7. Coeficientes de correlação de Pearson entre o nível a montante e a geração

o fato de que Gafanhoto possui o reservatório de pequenas dimensões, sendo o menor entre as usinas estudadas. Além da baixa capacidade de regulação do seu reservatório, há ainda a presença da usina de Cajuru localizada no mesmo rio (Rio Pará) a 24 km a montante de Gafanhoto e que foi inicialmente construída para regularizar a geração desta, evitando as perdas de produção em períodos de estiagem [22]. De fato, ao analisar a correlação entre o nível e a vazão do reservatório de Cajuru com a geração de Gafanhoto encontra-se os coeficientes de 0,324 e 0,782 respectivamente. Ademais, a correlação entre as vazões afluentes dos dois reservatórios apresenta um coeficiente de 0,899. Assim é possível observar a significativa influência do reservatório de Cajuru sobre a geração de Gafanhoto. A usina de Cajuru manteve uma correlação fraca com valor de 0,123. Deve-se considerar que embora tenha o maior reservatório entre as PCHs analisadas, Cajuru possui a menor potência instalada.

Já Três Marias, que apresentou o maior coeficiente para a correlação anterior, apresentou um coeficiente fraco para a correlação entre vazão e geração, com um valor de 0,142. Devido às grandes dimensões do seu reservatório, é natural que esta usina possua grande capacidade de acumulação e regularização, não sendo fortemente influenciada por variações de vazão a curto prazo e dependendo mais do seu nível para manter a geração de energia.

Houve um pequeno decréscimo na correlação de Queimado que passou a ter um coeficiente de 0,339. Rio de Pedras por sua vez, apresentou uma correlação insignificante. Deve-se observar que tanto o Rio das Velhas, onde a usina está instalada, quanto o seu reservatório estão seriamente afetados por um processo de assoreamento, afetando negativamente a vazão afluente e nível útil do reservatório. Este reservatório que em sua construção alcançava dezenas de metros de profundidade atualmente opera com menos de 20% de sua capacidade e apresenta pouco mais de um metro de profundidade [23].

Para a correlação entre o IPP e a geração foram utilizados os IPPs de 9, 12 e 24 meses, pois escalas de tempos maiores tem uma maior influência sobre o nível de reservatórios. Escalas de tempo maiores que 24 meses não foram analisadas uma vez que não apresentam resultados confiáveis [9]. A correlação entre a geração e o IPP9, Fig. 9, se mostra fraca para as usinas de Cajuru, Gafanhoto e Rio de Pedras, apresentando os

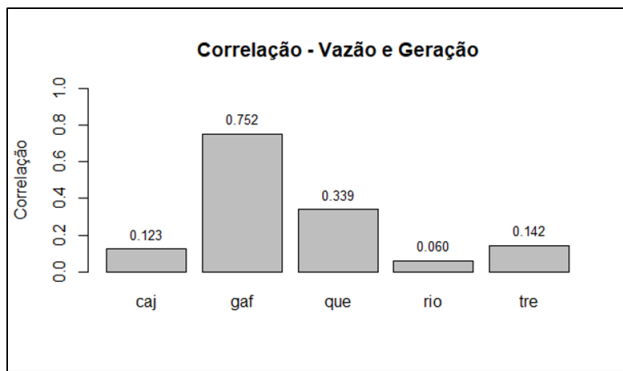


Fig. 8. Coeficientes de correlação de Pearson entre a vazão afluente a geração

valores de 0,278, 0,311 e 0,266 respectivamente. Já as usinas de Queimado e Três Marias apresentam correlação moderada, com valores de 0,458 e 0,482, respectivamente.

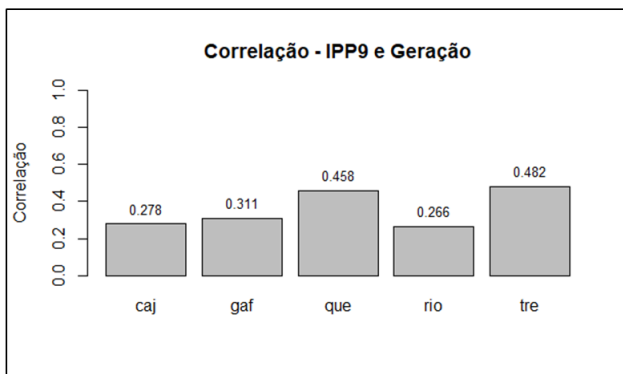


Fig. 9. Coeficientes de correlação de Pearson entre o IPP9 e a geração

Os coeficientes de correlação entre o IPP12 e a geração, Fig. 10, são ligeiramente maiores do que os obtidos para o IPP9, exceto para a usina de Três Marias, que apresentou uma pequena redução em relação ao valor da correlação anterior, caindo de 0,482 para 0,471.

Dessa forma, é possível observar que, no geral, para os empreendimentos estudados, o IPP de uma escala de tempo de 12 meses tem mais influência na geração do que o IPP para uma escala de tempo de 9 meses.

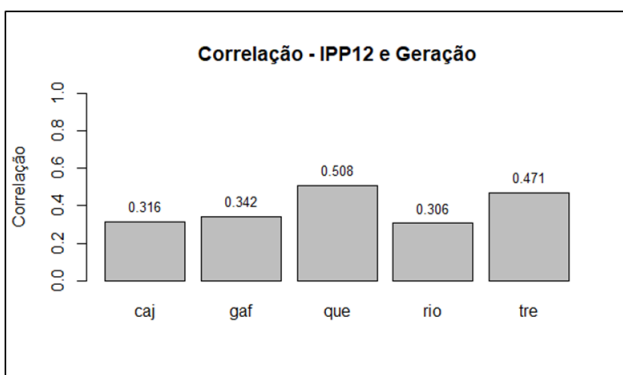


Fig. 10. Coeficientes de correlação de Pearson entre o IPP12 e a geração

A correlação entre o IPP24 e a geração, Fig. 11, é praticamente a mesma nas usinas de Cajuru e Queimado em relação a correlação anterior entre o IPP12 e a geração. Para as usinas de Gafanhoto e Rio de Pedras houve um pequeno aumento nos coeficientes que passaram de 0,342 para 0,402 e de 0,306 para 0,340 respectivamente. Para a usina de Três Marias houve novamente uma redução do coeficiente em relação ao coeficiente anterior uma vez que passou de 0,471 para 0,327.

A análise retornou coeficientes de correlação baixos e moderados para as usinas analisadas. Vários fatores podem causar uma menor correlação entre o regime de chuvas e a geração, como a não conversão do volume precipitado devido à interceptação da chuva pela cobertura vegetal ou solo, a redução do volume de água em lençóis freáticos e o assoreamento de rios, além, ainda, de limitações físicas do empreendimento ou indisponibilidade de equipamentos devido à manutenção [21].

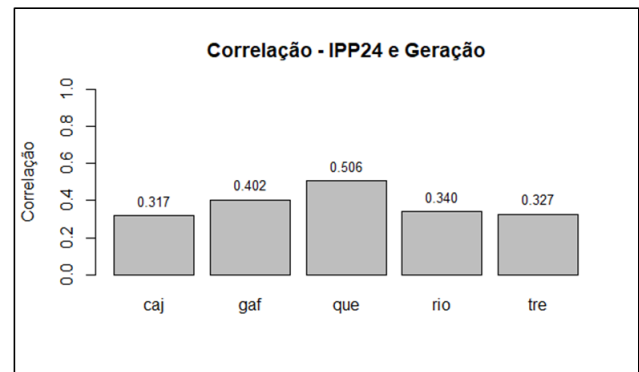


Fig. 11. Coeficientes de correlação de Pearson entre o IPP24 e a geração

B. Correlação Entre os Dados Para os Últimos Anos

Uma vez analisadas as correlações para todo o período de registro dos dados, foram analisadas as correlações apenas para os últimos anos. Os dados de geração das usinas sugere um decréscimo na geração de energia que se inicia aproximadamente em 2013. Essa redução está presente em todas as usinas analisadas e a Fig. 12 ilustra este fato para Três Marias. Portanto, as análises de correlação para os últimos anos foram feitas entre janeiro de 2013 e dezembro de 2017.

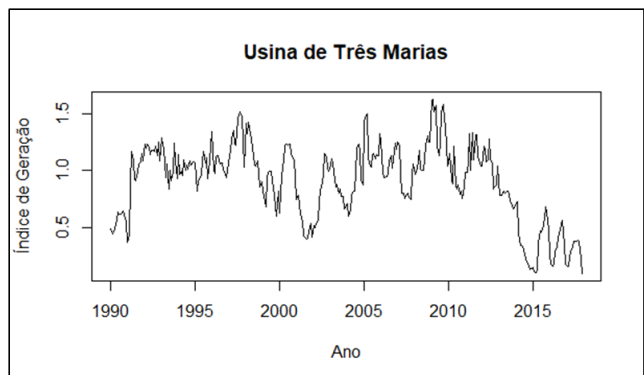


Fig. 12. Índices de geração da Usina de Três Marias

O coeficiente de correlação entre o nível e a geração, Fig. 13, é moderado para todas as usinas exceto Rio de Pedras, que se mostra fraco. No geral, as usinas mostram uma correlação consideravelmente maior entre o nível de seus reservatórios e a geração de energia para esse período de análise.

A correlação entre a vazão e a geração, Fig. 14, também é maior quando considerados apenas os últimos anos. Nota-se um grande aumento para a Usina de Cajuru, que passou de um coeficiente de correlação de 0,123 para um coeficiente de correlação de 0,672. Rio de Pedras passou de um coeficiente de correlação nulo para fraco e Três Marias seguiu o caminho inverso, passando de um coeficiente fraco para nulo.

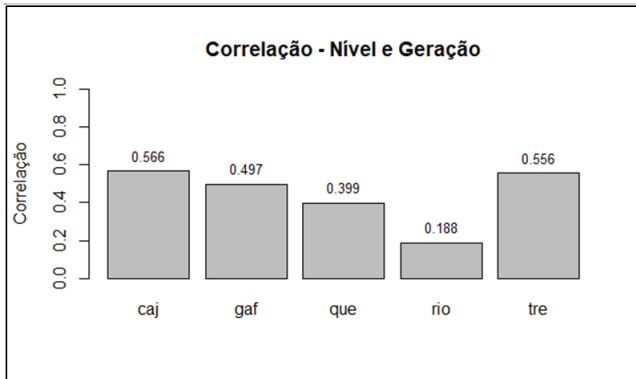


Fig. 13. Coeficientes de correlação de Pearson entre o nível a montante e a geração para os últimos anos

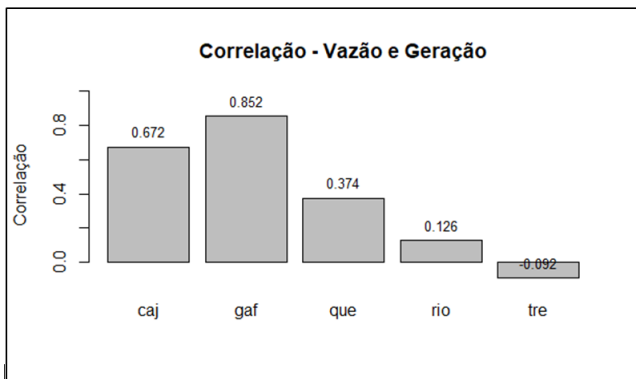


Fig. 14. Coeficientes de correlação de Pearson entre a vazão afluente e a geração para os últimos anos

É possível perceber que as correlações para os últimos anos são significativamente maiores quanto maior a escala de tempo utilizada. As Fig. 15, 16 e 17 ilustram isso.

A nova correlação entre o IPP9 e a geração é ligeiramente maior que a anterior para as usinas de Cajuru, Gafanhoto e Três Marias. Já para as usinas de Queimado e Rio de Pedras se torna nula, sendo que a correlação anterior para essas usinas era moderada e fraca respectivamente. Excetuando Três Marias, a correlação entre o IPP12 e a geração para os últimos anos mostra considerável aumento se comparado com o IPP9.

Já a análise de correlação entre o IPP24 e a geração apresentou coeficientes superiores para todas as usinas em comparação com o IPP12 e, mais ainda, com o IPP9. Tal fato

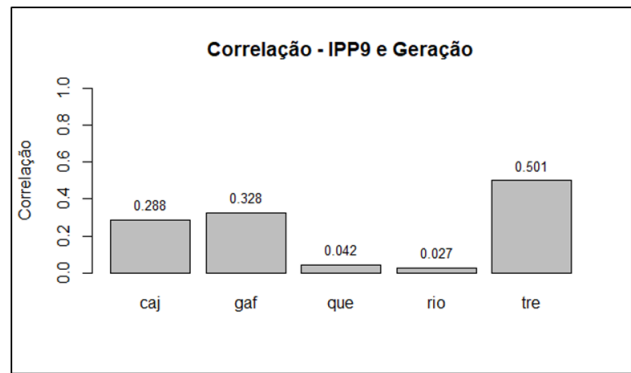


Fig. 15. Coeficientes de correlação de Pearson entre o IPP9 e a geração para os últimos anos

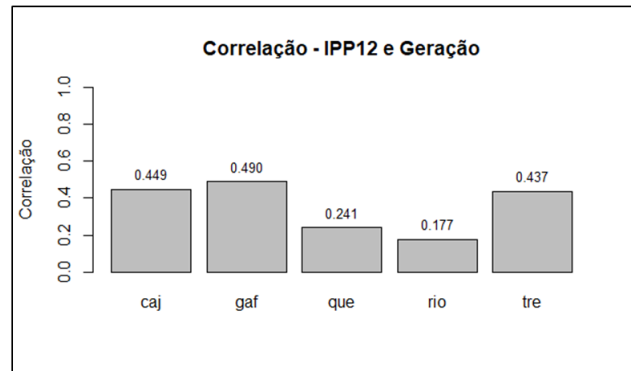


Fig. 16. Coeficientes de correlação de Pearson entre o IPP12 e a geração para os últimos anos

indica que, para os últimos anos, o regime de chuvas nos 24 meses anteriores à geração foi mais influente do que o regime de chuvas de 12 meses, que por sua vez, foi mais influente do que o regime de chuvas de 9 meses.

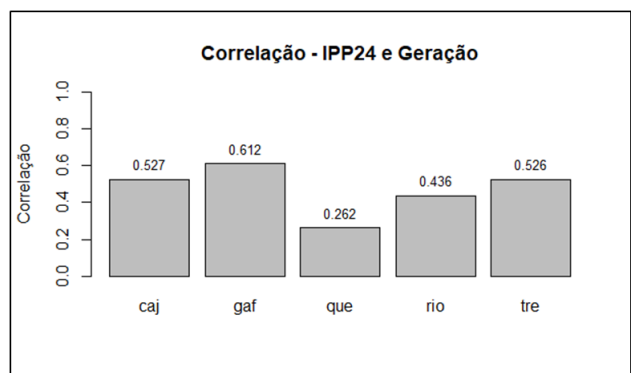


Fig. 17. Coeficientes de correlação de Pearson entre o IPP24 e a geração para os últimos anos

V. CONCLUSÃO

A correlação entre o IPP e a geração das usinas se mostrou fraca ou moderada durante os períodos analisados. No geral, a correlação para os últimos anos, onde os índices de geração das usinas foram menores, foi ligeiramente maior do que a encontrada para o maior período analisado.

Deve-se considerar, também, que coeficientes menores de correlação podem estar relacionados às características do local de instalação da usina, que podem contribuir para uma menor conversão do volume de precipitação em vazão afluente às usinas, ou simplesmente às limitações físicas destas.

Já as correlações analisadas entre o nível à montante e a geração e entre a vazão afluente e a geração se mostraram mais dependentes das características dos reservatórios, como era esperado. Três Marias, cujo reservatório possui as maiores dimensões, mostrou correlações maiores entre o nível e a geração enquanto Gafanhoto, que possui o menor reservatório, obteve maiores correlações entre a vazão e a geração.

Ainda assim algumas particularidades foram encontradas, como nas usinas Rio de Pedras e Cajuru que apresentaram correlações baixas ou nulas. Em Rio de Pedras, tanto o reservatório quanto o rio, sofrem um severo processo de assoreamento, o que interfere negativamente na geração e causa a baixa correlação entre as variáveis analisadas. Cajuru, possui o maior dos reservatórios entre as PCHs analisadas, mas possui também a menor potência instalada. Tal característica também contribui para as baixas correlações, uma vez que mesmo em situações de grande disponibilidade hídrica, a usina não poderá gerar mais energia que a sua potência instalada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, *campus* Contagem, pelo financiamento deste trabalho na forma de bolsa de estudos.

REFERENCES

- [1] R. V. Marques, M. B. Rocha, R. M. F. Johnsson. "Crise Hídrica de 2014-2015 no Sudeste do Brasil: Análise nas Revistas Científicas Americanas Brasil e Veja". *Revista Ciências & Ideias* ISSN:2176-1477 11.1 (2020): pp. 49-67.
- [2] R. Ferreira, "Electrical expansion in South America: Centralized or distributed generation for Brazil and Colombia". *IEEE Power and Energy Magazine* 17.2 (2019): pp. 50-60.
- [3] D. B. S. Alencar, C. L. Silva, C. A. S. Oliveira, "Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal". *Engenharia Agrícola*, vol. 26, no. 1, pp. 103-112. 2006.
- [4] M. Naghettini, E. J. A. Pinto, *Hidrologia estatística*. CPRM. 2007.
- [5] M. Naghettini, *Introdução à Hidrologia Aplicada*, 10.13140/RG.2.2.22848.33286. 2016.
- [6] J. M. Bravo, "Avaliação dos benefícios de previsões de vazão na operação de reservatórios". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 13, pp. 197-213. 2009.
- [7] O. A. Passaia, R. C. Paiva. "XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: Análise Exploratória do Comportamento de Reservatórios do Sistema Interligado Nacional". *Associação Brasileira de Recursos Hídricos* ISSN 2318-0358 (2019).
- [8] T. B. McKee, N. J. Doesken, J. Kleist, "The relationship of drought frequency and duration to times scale". In: *Conference On Applied Climatology*, Boston, pp. 179-184. 1993.
- [9] M. Svoboda, M. Hayes, D. Wood, "Standardized precipitation index user guide". *World Meteorological Organization Geneva*. 2012.
- [10] M. N. Kumar, "On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment". *Meteorological Applications*, vol. 16, no. 3, pp. 381-389. 2009.
- [11] N. Diodato, "Decadal Oscillation in the Predictability of Palmer Drought Severity Index in California". *MDPI Climate* 7.1 (2019): 6.
- [12] J. Keyantash, "The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Index (SPI)". Last modified 0 Ago 2018. [Online]. Available: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>. [Accessed 11 Nov 2020].
- [13] C. E. M. Tucci, "Hidrologia: ciência e aplicação". 2012.

- [14] S. A. Rodrigues, G. C. Batistela, "Uma Revisão Sobre a Disponibilidade Hídrica Brasileira para Geração de Energia Elétrica". *Geoambiente Online*, no. 21. 2013.
- [15] G. M. Pereira, "Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo". São Paulo: Oficina de Textos, pp. 74-77. 2015.
- [16] M. C. T. Brito, "Análise da repactuação do risco hidrológico das usinas hidrelétricas participantes do mecanismo de realocação de energia". *UFRJ/COPPE*. Rio de Janeiro (2016).
- [17] D. B. Figueiredo Filho, J. A. S. Junior, "Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)". *Revista Política Hoje*, vol. 18, no. 1. 2010.
- [18] L. V. Pova, J. T. Nery, "Precipitation Intensity, Concentration and Anomaly Analysis". *The Comprehensive R Archive Network*. 2016.
- [19] A. Zeileis, et al., "S3 Infrastructure for Regular and Irregular Time Series (Z's Ordered Observations)". *The Comprehensive R Archive Network*. 2018.
- [20] V. Spinu, et al., "Make Dealing with Dates a Little Easier". *The Comprehensive R Archive Network*. 2018.
- [21] J. M. da Silva, et al., "Correlação entre o índice padronizado de precipitação e geração de centrais hidrelétricas de pequeno porte". *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 5, no. 3. 2016.
- [22] Cemig, "Relatório Técnico – Pequena Central Hidrelétrica Cajuru". *Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SEMAD*. Belo Horizonte. 2010.
- [23] Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, "Programa Revitaliza Rio das Velhas". *Revista Rio das Velhas*, Belo Horizonte, no. 6. 2017.



Gabriel L. L. Sousa possui graduação em Engenharia Elétrica (2018) pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, *campus* Contagem, MG. Suas áreas de interesse são planejamento e operação de sistemas de energia elétrica.



Marcio F. Dutra e Campos possui graduação em Engenharia Elétrica (1990) pela Universidade Federal de Minas Gerais, mestrado em Engenharia Elétrica (1993) pela Universidade Estadual de Campinas e é doutorando em Engenharia Elétrica pela Unicamp. É professor e pesquisador da PUC Minas, onde atua e participa de projetos na área de sistemas computacionais, processamento de sinais, matemática computacional e redes de computadores.



Maury Meirelles Gouvêa Jr. possui graduação (1995) e mestrado (1998) em Engenharia Elétrica, com ênfase em sistemas de energia elétrica, pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e doutorado em Inteligência Artificial (2009) pela Universidade Federal de Pernambuco. Foi professor visitante da Universidade de Strathclyde, Glasgow, Escócia, em 2007. É professor e pesquisador da PUC Minas desde 2003, onde conduz e participa de vários projetos de pesquisa e divulgação científica ligados ao planejamento e operação ótima de sistemas de energia elétrica e inteligência artificial. Suas áreas de interesse são estabilidade de sistemas elétricos, dinâmica de sistemas complexos, computação evolucionária e redes neurais.