

INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA DECADAL NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E ENERGÉTICA DA USINA DE SOBRADINHO

José Micael Ferreira da Costa¹

Cleiton da Silva Silveira²

Diógenes Passos Fontenele³

Antonio Duarte Marcos Junior⁴

RESUMO

Objetiva-se com este estudo demonstrar as relações existentes entre o nexus clima-água-energia na usina Sobradinho, através da análise de fenômeno climático decadal bem como em simulações que auxiliam na Gestão dos Recursos Hídricos e no cálculo da Energia Hidrelétrica gerada. A metodologia consiste na análise das séries temporais de precipitação (1961-2016) e vazão (1931-2016), e a obtenção dos Espectros de Ondeletas Globais (Wavelets) das séries de anomalias de vazão e do índice climático Oscilação Multidecadal do Atlântico - OMA (1860-2016), almejando encontrar correlações entre ciclo hidrológico e variabilidades climáticas. Em seguida, foram obtidas as curvas de permanência da vazão natural em Sobradinho e a garantia no abastecimento em 90% do tempo (Q_{90}), com base nas fases negativa (1965-1995) e positiva (1996-2016) da OMA. Também foram feitas simulações no software Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água - SIGA, o qual possibilitou operar o sistema da Bacia do Rio São Francisco - BRSF onde Sobradinho está inserida, a fim de gerar dados simulados de vazão defluente e volume do reservatório (1965-2016) para o cálculo da Energia Natural Afluenta - ENA. Os resultados demonstraram que há indícios de interferência do fenômeno climático OMA no ciclo hidrológico, com períodos decadais que oscilam, beneficiando (fase negativa da OMA) ou prejudicando (fase positiva da OMA) a Gestão Hídrica e a Geração Hidrelétrica em Sobradinho. No entanto, o período úmido da OMA se mostrou mais favorável à usina, pois a curva de permanência, a garantia Q_{90} assim como a Geração Hidrelétrica gerada nesse período se mostraram superiores.

Palavras-chave: Variabilidade Climática; Ciclo Hidrológico; Garantia no Abastecimento; ENA.

ABSTRACT

Influence of decadal climate variability on the water and energy availability of Sobradinho plant.

This study aims to demonstrate the existing relationships between the climate-water-energy nexus at the Sobradinho plant, through the analysis of decadal climatic phenomena as well as simulations that help in the Management of Water Resources and calculation of the Hydroelectric Energy generated. The methodology consists of analyzing the precipitation (1961-2016) and flow (1931-2016) time series and obtaining the Global Wave Spectra (Wavelets) of the flow anomaly series and the Atlantic Multidecadal Oscillation Index

1 Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, Porto, Porto, Portugal. E-mail para correspondência: jmicaelcosta@gmail.com

2 Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP, Porto, Porto, Portugal.

3 Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, Fortaleza, CE, Brasil.

4 Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará – UECE, Fortaleza, CE, Brasil.

- OMA (1860-2016), aiming to find correlations between hydrological cycle and climatic variability. Then, the natural flow permanence curves in Sobradinho and the guarantee of supply in 90% of the time (Q90) were obtained, based on the negative (1965-1995) and positive (1996-2016) phases of OMA. Simulations were also carried out in the Information System for Water Allocation Management - SIGA software, which made it possible to operate the São Francisco River Basin - BRSF system where Sobradinho is inserted, to generate simulated data of flow and reservoir volume (1965-2016) for the calculation of Affluent Natural Energy - ANE. The results showed that there are signs of interference from the climatic phenomenon OMA in the hydrological cycle, with decadent periods that fluctuate, benefiting (negative phase of OMA) or damaging (positive phase of OMA) the Water Management and Hydroelectric Generation in Sobradinho. However, the wet period of OMA proved to be more favorable to the plant. Since the permanence curve, the Q90 guarantee, and the Hydroelectric Generation generated in that period were superior.

Keywords: Hydrological Cycle; Climatic Variability; Supply Guarantee (Q90); ANE.

INTRODUÇÃO

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários (ONS, 2017).

Sistemas energéticos como o brasileiro, cujo planejamento e a geração eletroenergética apresentam correlação com os estoques de água existentes nos reservatórios das usinas hidrelétricas e as suas aflúncias, estão sujeitos a impactos advindos da variabilidade e das mudanças no clima, tanto na produção de energia, em suas diversas formas, quanto no seu consumo. Existe, portanto, uma relação de interdependência entre água e energia (Rothausen e Conway, 2011; Scanlon et al., 2013), sendo o clima o elo que pode afetar e ser afetado nessa relação.

A recente crise energética brasileira mostrou a dependência da matriz energética do país e de seus recursos hídricos às condições climáticas. No Brasil, particularmente, de todas as variáveis climáticas, a precipitação e a vazão são as que melhor caracterizam a variabilidade climática sobre o Nordeste Brasileiro (NEB) e, provavelmente, as que impactam mais direta e significativamente em associação com a população, enquanto suas variações e mudanças resultam frequentemente, em repercussões econômicas nos meios ambiente, sociais e políticos (Medeiros, 2016).

Scanlon et al. (2013) mencionam que o acréscimo na demanda por energia aumenta também a demanda por água e leva a uma redução quantitativa deste recurso. Além disso, há uma tendência de aumento da demanda de água da irrigação no Brasil que pode levar à diminuição da segurança alimentar e maior vulnerabilidade para agricultores rurais, especialmente nas regiões semiáridas. Esses impactos se propagam nos diversos setores econômicos (Domingues et al., 2016), por exemplo, aumenta o custo de produção agrícola e da pecuária, eleva o custo dos insumos para o setor de alimentos e para o consumo das famílias.

A disponibilidade de água no Brasil depende em grande parte do clima. O ciclo anual das chuvas e de vazões no país varia entre bacias, e de fato a variabilidade interanual do clima, associada aos fenômenos de El Niño, La Niña, ou à variabilidade na temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico Tropical e Sul podem gerar anomalias climáticas, que produzem grandes secas, como em 1877, 1983 e 1998 no

Nordeste, 2004-2006 no Sul do Brasil, 2001 no Centro-Oeste e Sudeste, e em 1926, 1983, 1998 e 2005 na Amazônia (Marengo e Nobre, 2004; Marengo et al., 2012; Silva, 2013), assim como projeções de secas futuras (da Costa et al., 2018; Marcos Junior et al., 2018; Silveira et al., 2019; da Silva, 2020).

As condições climáticas de um conjunto de anos ou décadas depende tanto de variações climáticas naturais, como fenômenos interanuais e de baixa frequência ou das forças antrópicas (Silveira et al., 2013). Alguns autores como Alves et al. (2013), Silveira et al. (2017) e Martins et al. (2018) apontam os fenômenos de baixas frequências como alguns dos responsáveis pela variabilidade climática em escala decadal, principalmente na região tropical. Um exemplo disso é a relação da Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA), a qual é uma componente associada à variabilidade da TSM com a modificação do ciclo hidrológico.

O objetivo principal deste trabalho é analisar o nexus existente entre clima, água e energia, com enfoque na usina Sobradinho, visando identificar uma possível variabilidade climática decadal ocasionada pela OMA, a qual impacta na Gestão Hídrica e Geração Hidrelétrica. Para isso, pretende-se analisar a variabilidade climática decadal por meio da variabilidade e/ou tendência das séries temporais e do Espectro de Ondeleta Global (Wavelet); obter a Curva de Permanência e a às vazões com garantia de 90% (Q_{90}); simular as garantias de atendimento hídrico às múltiplas demandas; Calcular a energia hidrelétrica gerada e sua média.

MATERIAL E MÉTODOS

Após a definição da área de estudo, houve obtenção de dados para os três nexus: clima, água e energia; cujos processos subsequentes são apresentados no fluxograma esquemático da figura 1.

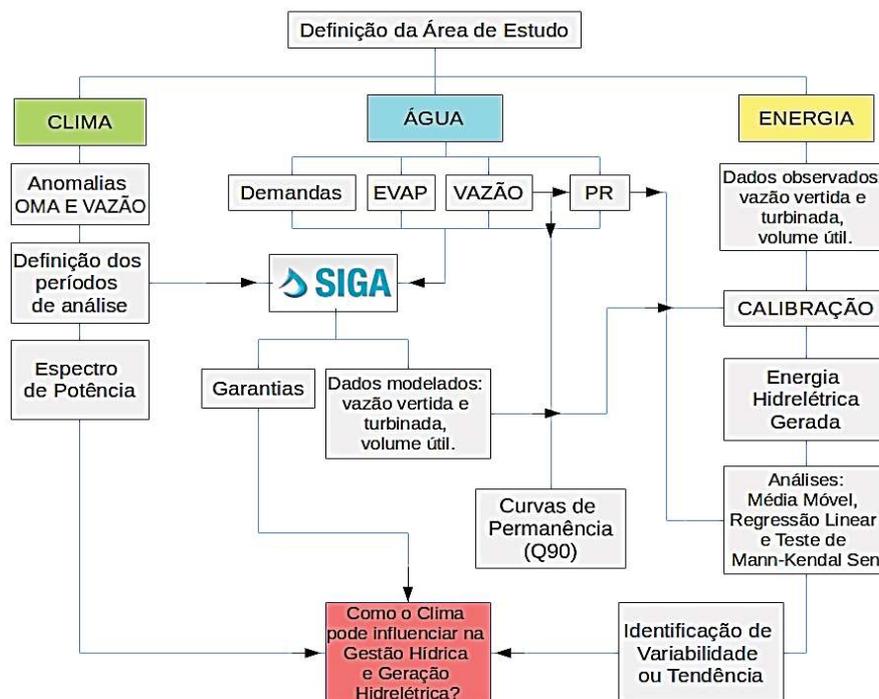


Figura 1. Fluxograma contendo as etapas da metodologia adotada no trabalho.

A primeira etapa se deu através das análises de tendência e variabilidade climática nas séries de Precipitação (1961-2016) e Vazão (1931-2016), por meio de métodos clássicos como: Média Móvel, Regressão Linear e Mann-Kendall Sen. Em seguida, com dados de anomalias na TSM referentes ao índice climáticos OMA (1860-2016) e vazão natural (1931-2016) da usina Sobradinho, aplicou-se a análise do Espectro de Ondeleta Global (Wavelet).

A segunda etapa foi gerar a curva de permanência da vazão natural em Sobradinho (1931-2016), a qual também possibilitou encontrar a garantia Q90 para os períodos de análise da OMA (Quadro 1).

A terceira etapa foi a simulação no software SIGA, o qual simula a operação dos reservatórios mediante o balanço hídrico. Segundo às respostas das simulações realizadas no SIGA, foi possível gerar dados de vazão defluente (vertida e turbinada) e volume útil do reservatório de Sobradinho.

A quarta etapa foi o cálculo da ENA (1993-2016), realizada com o uso de dados simulados gerados no SIGA (terceira etapa) e os mesmos tipos de dados históricos observados disponíveis para Sobradinho. Desse modo, realizou-se a calibração dos dados, comparando a dimensão e correlação entre os resultados modelados e observados. Em seguida, simulou-se a ENA para o período histórico (1965-2016) e foram feitas as médias de energia hidrelétrica gerada para cada um dos períodos da OMA.

Região de Estudo

O estudo foi realizado visando à usina Sobradinho, pertencente à região da BRSF (Figura 2). A usina localiza-se na região do Baixo São Francisco (BSF), que corresponde a um trecho de rio encaixado e de vazões regularizadas, a jusante de Belo Monte até a foz no Oceano Atlântico, na divisa dos Estados de Sergipe e Alagoas, ambos localizados no NEB. Compreende-se entre as usinas Retiro Baixo, Três Marias e Itaparica, às quais também possuem reservatório e serão consideradas em algumas etapas deste estudo.

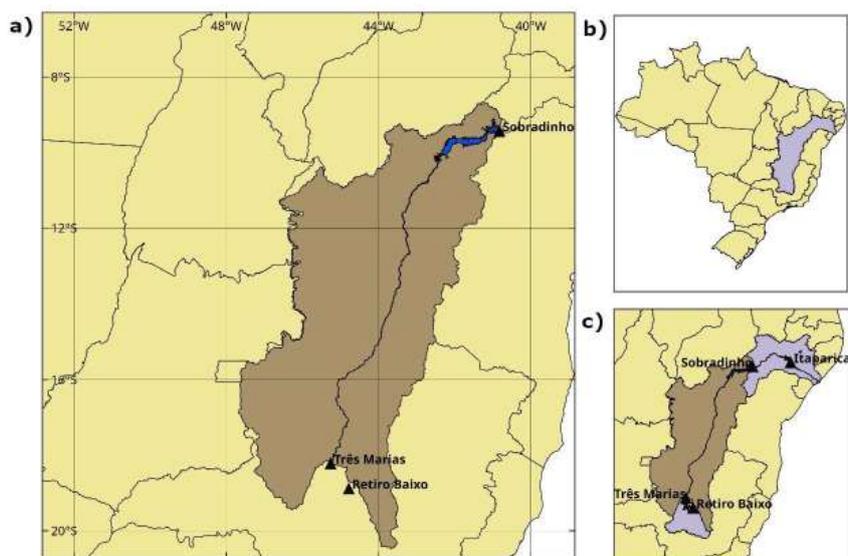


Figura 2. Localização: a) Sobradinho Incremental; b) BRSF no Brasil; c) Sobradinho na BRSE.

Base de Dados

Os dados históricos mensais de anomalia do índice climático OMA, foram extraídos do site da National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA. Também foram utilizados os dados das séries históricas de vazões mensais naturalizadas (m^3/s), disponibilizados pelo ONS. Os dados históricos mensais de precipitação e Evaporação foram obtidos através do site do Instituto Nacional de Meteorologia - Inmet. Os valores das demandas foram cedidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - Funceme.

As informações gerais de Cota – Área – Volume dos reservatórios para simulação foram cedidos pelas empresas que gerenciam as usinas (Cemig - Três Marias; Chesf - Sobradinho (Ex), Itaparica e Retiro Baixo. Os dados observados de Vazões Vertidas e Turbinadas, assim como de Volume Útil, para Sobradinho, foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas - ANA.

Os valores dos coeficientes dos polinômios que representam as cotas de montante, jusante e rendimento para o reservatório de Sobradinho, bem como às constantes que depende das características físicas do conduto forçado para obtenção dos rendimentos das turbinas, foram obtidos conforme metodologia utilizada por Madera (2013).

Clima

Nesta parte do estudo foram feitas análises de tendência e variabilidade nos dados de precipitação e vazão pelos métodos de Média Móvel, Regressão Linear, Teste de Mann-Kendall e Declividade de Sen e com auxílio da análise da transformada em ondeletas (Wavelets). Esta última pode ser feita conforme metodologia descrita em Weng e Lau (1994) e Torrence e Compo (1998). A análise de Wavelet pode ser aplicada utilizando-se o algoritmo elaborado por C. Torrence disponível em <http://paos.colorado.edu/research/Wavelets>.

De acordo com Santos et al. (2016), a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) é caracterizada pela alteração da TSM da região Norte do Oceano Atlântico, entre a região do Golfo do México e a Baixa da Islândia, em um período mais longo de tempo. A OMA possui fases quente (TSM positivas) e fria (TSM negativas) ao longo de sua série histórica, conforme demonstram Deser et al. (2010). Desse modo, foram escolhidos dois períodos característicos deste fenômeno, conforme pode ser visto na Tabela 1, os quais condizem com os dados disponíveis de precipitação, vazão natural e evaporação em Sobradinho.

Tabela 1. Períodos, segundo as fases da OMA, para as simulações no SIGA.

Período	OMA	Fase	Anos	
			Início	Término
1	Negativa (-)	Fria	1965	1995
2	Positiva (+)	Quente	1996	2016

Água

Curva de Permanência (Q_{90}) e Garantias

A permanência de cada vazão observada é o percentual de vezes em que ela foi igualada ou superada (Benetti *et al.*, 2003; Cruz e Tucci, 2008). Segundo Fennessey e Voguel (1990), a curva de permanência (CP) é calculada através dos dados históricos de vazões, os quais são ordenados de forma decrescente e associados a cada valor uma frequência de excedência, utilizando uma posição de plotagem empírica, tal como:

$$CP(\%) = \left(\frac{m}{n}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

onde:

m - a ordem do valor ordenado;

n - o número de valores da série.

A Q_{90} , por sua vez, é obtida através da CP, no ponto em que a mesma fornece uma garantia de vazão que supra o abastecimento em 90% do tempo aos usuários finais.

O Sistema de Suporte à Decisão (SIGA)

O módulo de operação de sistemas hídricos gera informações essenciais ao processo de tomada de decisão, incluindo alocação, na área de gestão e gerenciamento de recursos hídricos. Esse módulo faz o balanço de massa em cada elemento da rede considerando suas características físicas, a partir de diferentes cenários elaborados pelo usuário (Funceme, 2015). Um modelo de simulação da operação de reservatórios utiliza a solução do balanço hídrico.

O Módulo para Desenho de Rede de Fluxo é responsável pela representação do sistema hídrico, objeto da análise do SIGA. Essa representação é feita utilizando-se dois tipos básicos de elementos de rede: nós e trechos. Os Nós são definidos como elementos com ou sem capacidade de acumulação de água. Os trechos representam linhas de fluxo do sistema hídrico e sempre possuem capacidade de acumulação de água (Pereira e Cavalcanti, 2016).

Esses elementos, juntamente com os reservatórios e as demandas atribuídas [Abastecimento humano (AH), Irrigação (IRR) e Indústria (IND)], constituem a rede de fluxo hídrica, representativa do gerenciamento da BRSF. A montagem da Rede contendo as usinas de Retiro Baixo, Três Marias, Sobradinho e Itaparica, bem como suas respectivas demandas, encontram-se esquematizadas na Figura 3. Os valores para as demandas foram constantes ao longo de todo o período de análise.

Foram introduzidos no SIGA dados de Cota-Área-Volume, Precipitação, Evaporação e Vazão Natural incremental para a usina Sobradinho (além das usinas Retiro Baixo, Três Marias e Itaparica), bem como as demandas hídricas dos usos múltiplos na BRSF. Como retorno das simulações, foram obtidos dados de vazão vertida e turbinada, bem como de volume útil do reservatório de Sobradinho, o que possibilitou o cálculo da ENA desta usina, conforme metodologia descrita a seguir.

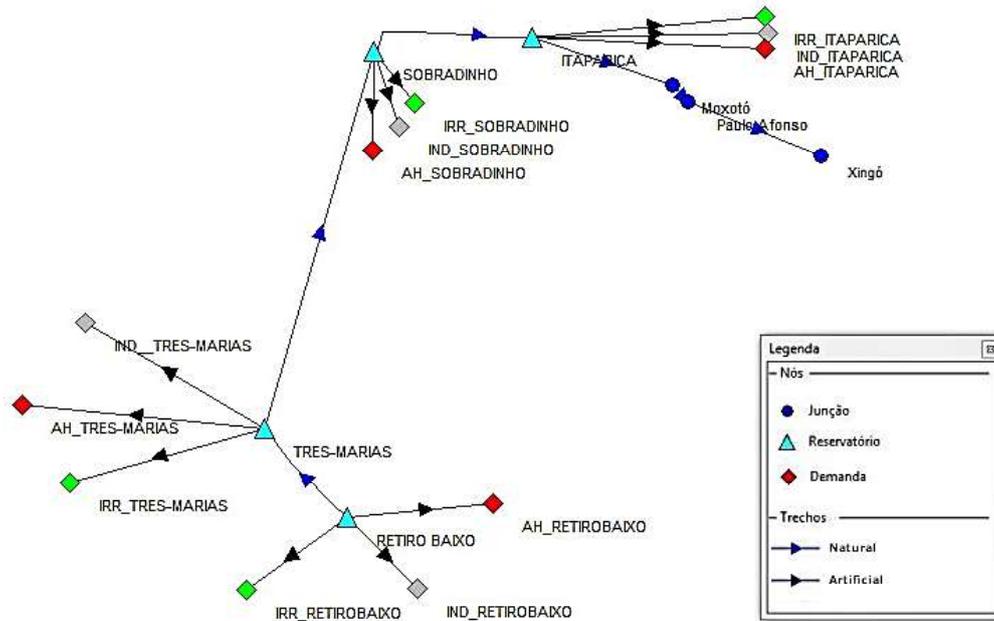


Figura 3. Esquemático da Rede simplificada da BRSF, gerada no programa SIGA.

Energia

Convencionalmente, tem-se que a potência produzida em uma unidade hidrelétrica de energia (UHE) é dada por:

$$ph = G \cdot \eta_t \cdot hl \cdot q \tag{2}$$

em que,

G - é uma constante com valor $9,81 \cdot 10^{-3}$ ($\text{kg/m}^2\text{s}^2$) que representa o produto entre a densidade da água (1000 Kg/m^3), a gravidade (g) e uma última constante com valor 10^{-6} que converte a energia de (J) em (MJ);

η_t - é o rendimento hidráulico da turbina;

hl - altura de queda líquida (m);

q - vazão turbinada em apenas uma unidade geradora (m^3/s).

Desse modo, em princípio se estabelece que a potência gerada na usina é obtida através do produto entre a Equação (2) e “n” unidades geradoras, de modo que a potência de saída na UHE corresponde a:

$$PH_{saída}(n) = G \cdot \eta_t \cdot hl \cdot Q \tag{3}$$

em que,

$PH_{saída}$ - é um vetor que possui n valores de potência gerada pela UHE (MW).

Usualmente, a altura de queda líquida têm sido representada por meio de polinômios de quarta ordem dependentes do volume armazenado (no caso do nível de montante) e da vazão defluente (no caso do nível de jusante). O valor da cota de montante é dado pelo seguinte polinômio:

$$fcm = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot V^3 + a_4 \cdot V^4 \quad (4)$$

em que,

fcm - é o valor da cota de montante (m);

a_0, \dots, a_4 - são os coeficientes do polinômio que representa a cota de montante para o reservatório;

V - volume armazenado (hm^3).

Por outro lado, o nível de jusante da usina é a cota do rio após a turbinagem. O mesmo pode ser dado através do polinômio que relaciona a vazão defluente (vazão turbinada - Q mais a vazão vertida - S na UHE) com os respectivos coeficientes:

$$fcj = b_0 + b_1(Q + S) + b_2(Q + S)^2 + b_3(Q + S)^3 + b_4(Q + S)^4 \quad (5)$$

em que,

fcj - é o valor da cota de jusante (m);

S - é a vazão vertida na UHE (m^3/s);

b_0, \dots, b_4 - são os coeficientes do polinômio que representa a cota de jusante para o reservatório.

Desse modo, com base nas Equações (4) e (5), a altura de queda líquida (m) passa a ser:

$$hl = fcm - fcj \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Clima

Espectro de Ondeletras Global (Wavelet)

Com o intuito de mostrar as relações existentes entre clima e água, o espectro global que indica os maiores níveis de energia (Potência) dentre uma série de dados, foi utilizado. Foram plotados os espectros para as séries históricas de anomalias analisadas, referentes à vazão natural em Sobradinho (Figura 4), bem como do índice climático AMO (Figura 5).

Os resultados demonstram que a potência está distribuída em várias escalas. Para o Espectro da vazão em Sobradinho, tem-se que a maior potência remonta a um período de 1 ano, que pode ser influência de fenômenos climáticos interanuais como o El-Nino, por exemplo. As demais maiores potências se encontram entre os períodos de 16-128 anos, sendo o maior dentre estes o pico próximo ao período de 128 anos. Foram observados picos menores nos períodos de 16, 32 e 64 anos, o que demonstra a influência de diferentes fenômenos climatológicos na vazão de Sobradinho. O Espectro relacionado à AMO demonstrou períodos de maiores potências e o pico em 64 anos.

Assim, é possível inferir que existe alguma relação entre as oscilações decadais do fenômeno climático OMA e a vazão em Sobradinho, mediante os picos de potência em torno do período multidecadal (64 anos). A

maior potência no Espectro da série de anomalias da OMA, para um período maior de análise, deve ser em torno de 60 anos, conforme resultados alcançados por Dewes e Dias (2006), o que condiz com os resultados obtidos.

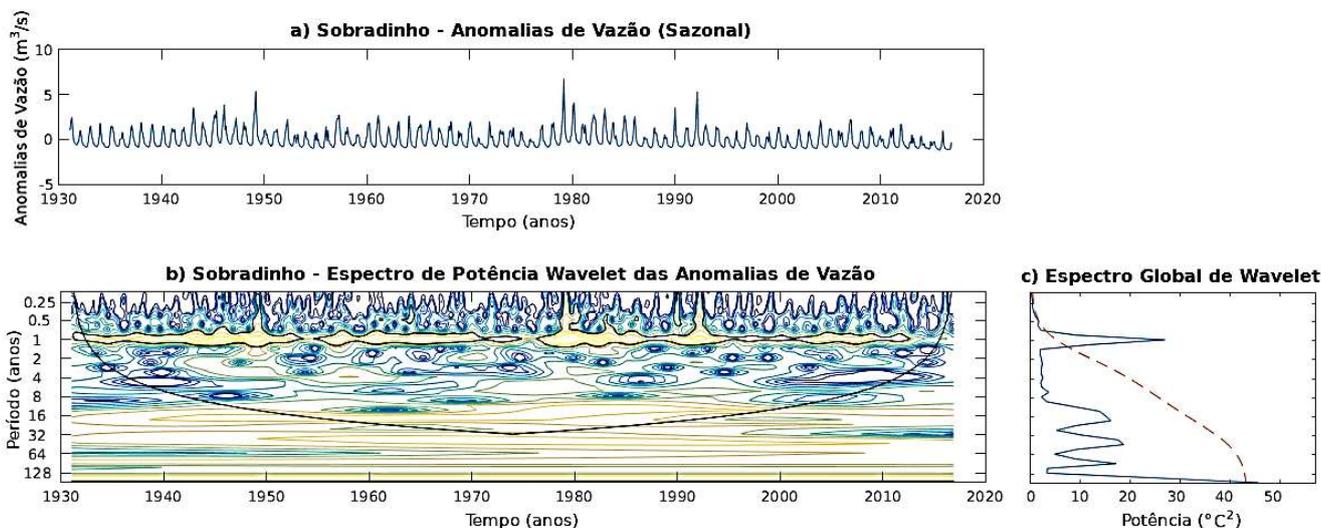


Figura 4. Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias de vazão em Sobradinho.

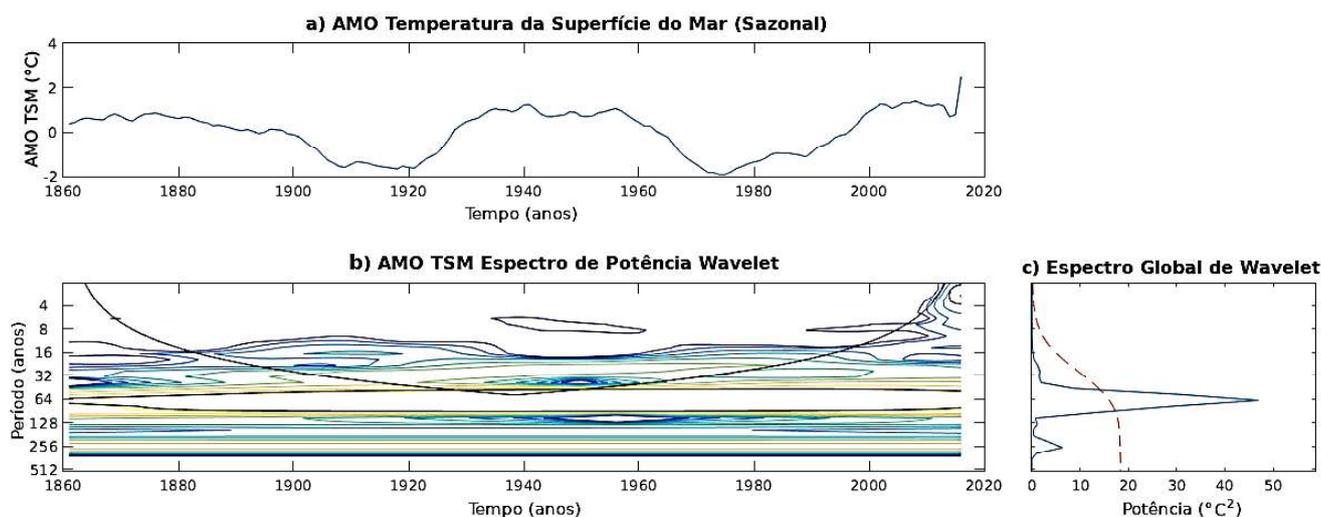


Figura 5. Espectro por Wavelet da série histórica de anomalias da OMA.

Análise das Séries Temporais de Precipitação e Vazão

Plotando-se os dados observados de precipitação para a usina de Sobradinho (Figura 6), é possível observar, mediante a média móvel, que existem oscilações decadais não tão acentuadas, sendo o período próximo ao ano de 1980 o de anos mais chuvosos. Analisando-se então a plotagem da série de vazão natural (Figura 7), observa-se de acordo com a média móvel que as oscilações são mais acentuadas, podendo perceber oscilações decadais, sendo os maiores picos de vazão nos anos de 1950 e 1985, o que caracteriza um período entre os picos de 35 anos. Isto pode indicar a presença de outros fenômenos climáticos, como a ODP e o ENOS que possui frequências média de ocorrência decadais menores e interanuais, respectivamente (Costa, 2012; Silva, 2013).

Ao comparar-se esses resultados aos períodos de fases do índice climático OMA (Tabela 1), é possível sugerir que a usina de Sobradinho foi beneficiada pela fase negativa do mesmo. De 1965 a 1995, com OMA (-), houve precipitação acima da média histórica e picos elevados de vazão, principalmente nos anos de 1979 e 1992 para ambos os casos. De 1996 até os dias atuais, com OMA (+), foram observadas precipitações e vazões abaixo da média histórica. No geral, os testes de tendência demonstram um decaimento quanto à precipitação e vazão durante o período histórico, principalmente nas últimas duas décadas, o que condiz com as secas recentes enfrentadas na região (Lima e Magalhães, 2019).

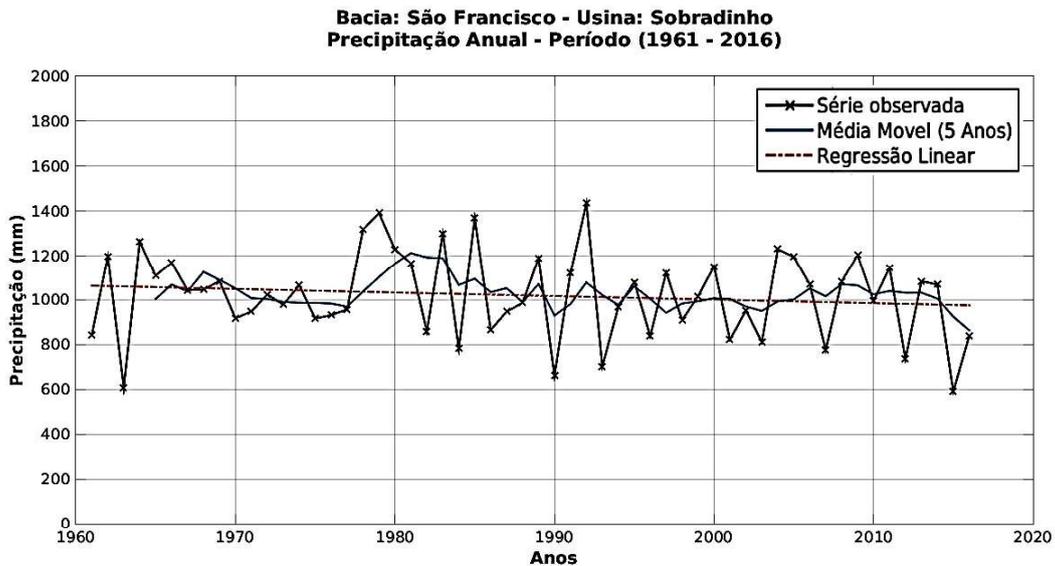


Figura 6. Série histórica de precipitação em Sobradinho.

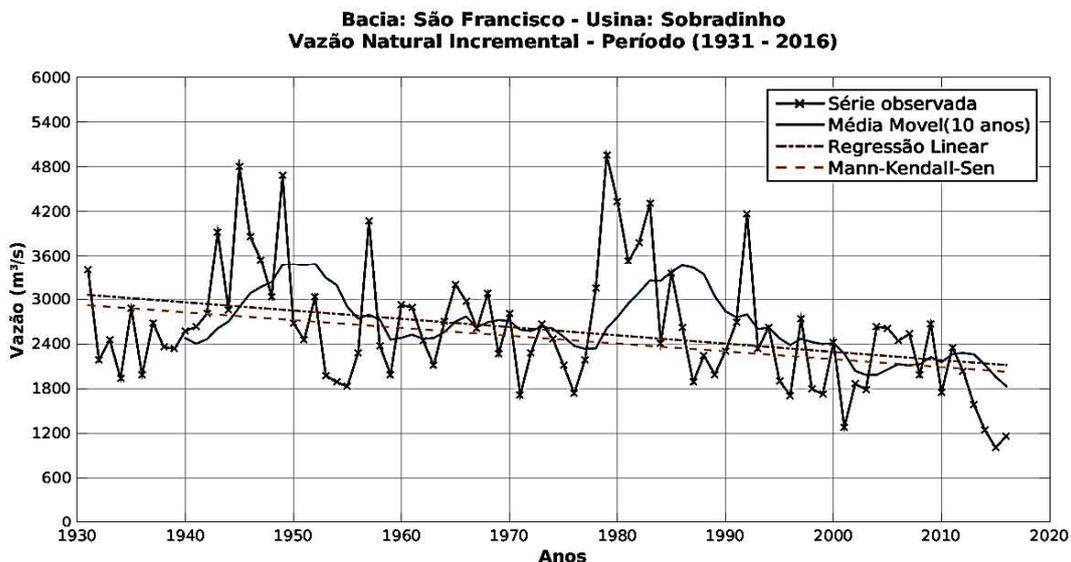


Figura 7. Série histórica de vazão naturalizada em Sobradinho.

Água

Curva de Permanência

A curva de permanência traçada para a vazão da usina de Sobradinho, conforme Figura 8, demonstra

que a frequência acumulada para cada um dos períodos de análise se mostraram diferentes entre si. Para o período considerado frio da OMA, a curva formada se mostrou favorável pois foi a série que apresentou os maiores valores de vazão. Enquanto que a série de dados referentes ao período considerado quente da OMA, se mostrou bem abaixo da curva do período frio. Isso indica que, no período considerado quente da OMA, houve reduções significativas da vazão em Sobradinho, demonstrando assim uma possível resposta ao fenômeno climático.

Ao se comparar as duas amostras de dados mencionadas à amostra de dados da série completa, observa-se que a série completa se mostrou no limiar entre as duas outras séries, ou seja, valores abaixo da amostra de período frio e acima da amostra de período quente, demonstrando assim a participação de ambas na modulação desta curva. Contudo, observa-se que ao início de cada curva a discrepância entre valores era maior, e foi diminuindo conforme se aumenta a frequência acumulativa, tornando os valores ao fim das séries próximos, o que se assemelha às vazões naturais do rio.

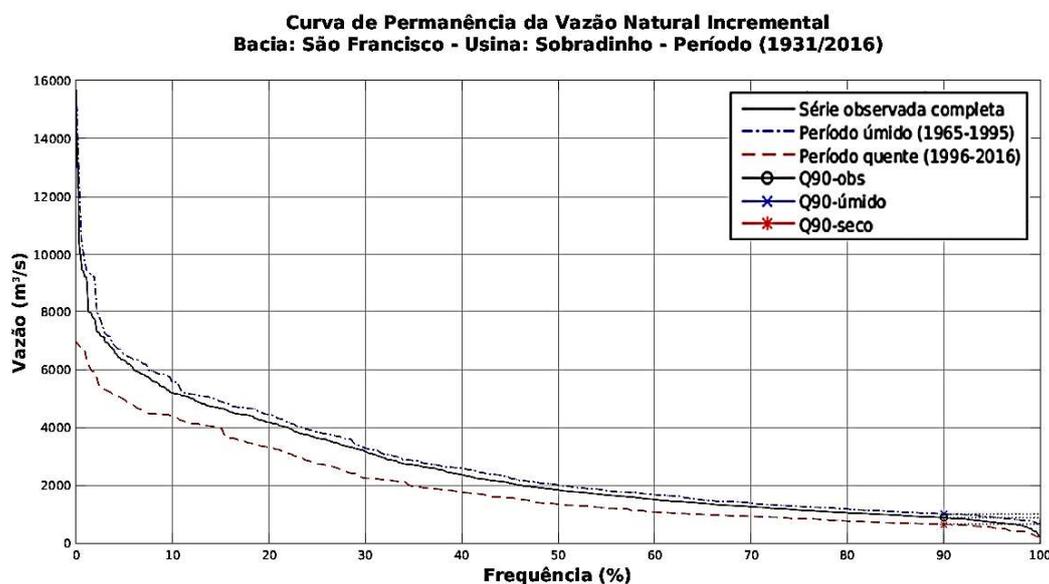


Figura 8. Curva de permanência referente aos períodos de análise da OMA com base na série histórica de vazão em Sobradinho.

Garantia (Q90)

Os valores de vazão que correspondem a uma garantia no abastecimento em 90% do tempo (Q90), foram obtidas através do percentil 90 de cada curva de permanência dos períodos analisados, para Sobradinho e demais usinas, conforme Figura 9. Os resultados apresentam de forma mais objetiva os valores das Q90, os quais em todas as usinas demonstraram resultados semelhantes, com a Q90 do período frio da OMA superior às demais. Logo, é possível perceber a relação existente entre o clima e a disponibilidade hídrica.

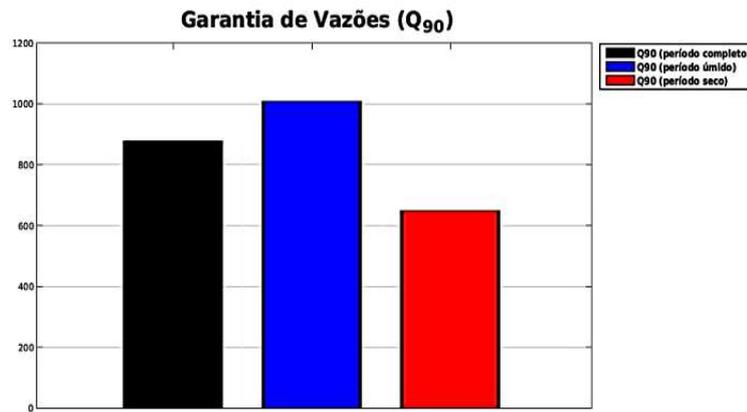


Figura 9. Q₉₀ referente aos períodos de análise da OMA com base nas séries históricas de vazões para a usina de Sobradinho.

Energia

Calibração

Inicialmente, o cálculo da Energia Hidrelétrica para a usina de Sobradinho foi feito para os dados históricos disponíveis a fim de se obter um padrão confiável de comparação para as simulações que haveriam de ser feitas. Em seguida, fez-se a plotagem da Energia Hidrelétrica gerada para a usina de Sobradinho através dos dados modelados pela simulação.

A fim de se realizar a calibração dos dados modelados, comparando-se os resultados de Energia gerada por ambos os métodos (observado e modelado), é possível visualizar conforme a figura 10 a semelhança no comportamento das séries, tanto em relação a grandeza dos valores como a variabilidade dos mesmos. Uma análise quantitativa foi adotada para mensurar o quanto o modelo consegue explicar os valores observados, através do coeficiente de determinação, também chamado de R^2 , que varia entre 0 e 1. O resultado obtido foi de $R^2 = 0,73346$, o que demonstra uma boa confiabilidade dos dados modelados.

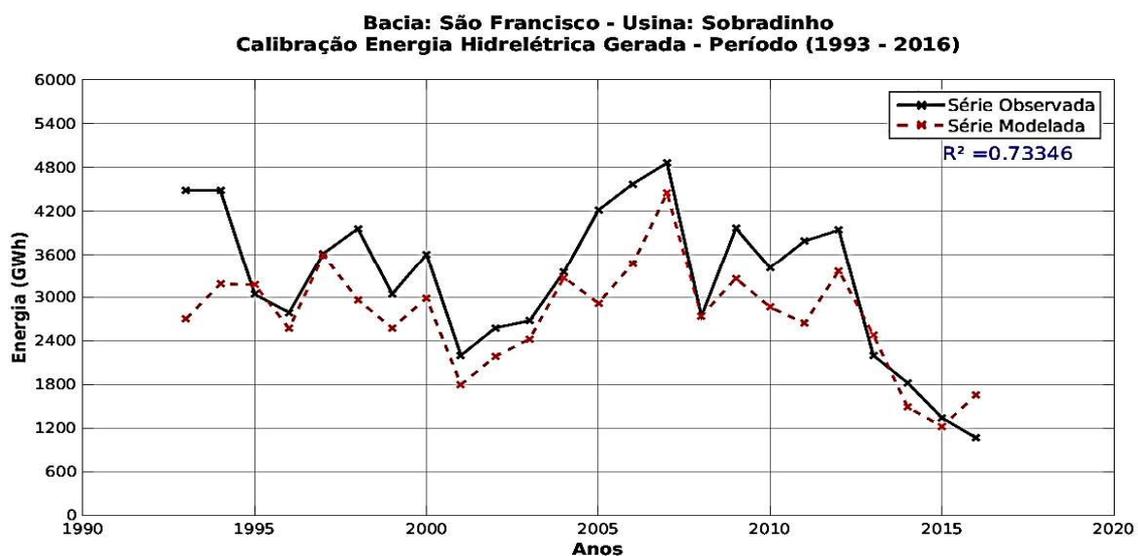


Figura 10. Calibração entre a Energia gerada na usina de Sobradinho com base em dados observados e modelados.

Geração de Energia Hidrelétrica

Mediante ao exposto, pôde-se então calcular a Energia Hidrelétrica gerada na usina de Sobradinho (Figura 11) através dos dados modelados e calibrados, para o período histórico a partir de 1965 os quais não possuem dados observados disponíveis para este cálculo.

Conforme observado na figura 11, a Energia gerada no período considerado frio da OMA foi superior à Energia gerada na fase quente deste mesmo fenômeno climático. O pico da fase fria ocorreu no ano de 1979, o que condiz com os picos observados nas séries históricas de precipitação e vazão em Sobradinho (Figuras 6 e 7). Já o maior pico encontrado na fase quente foi em 2007, enquanto que os picos encontrados nas séries históricas foram em 2009. Em 2007, houve baixa precipitação e vazão próxima à de 2009.

Outra forma de análise adotada para uma visualização mais clara deste resultado foi a obtenção das médias de Energia gerada em cada período de análise da OMA, conforme figura 12. Os resultados também demonstram uma maior geração de ENA no período em que a OMA encontrava-se em sua fase negativa/fria. Assim, é possível conjecturar que também há indícios de influência do fenômeno climático OMA na geração Hidrelétrica em Sobradinho.

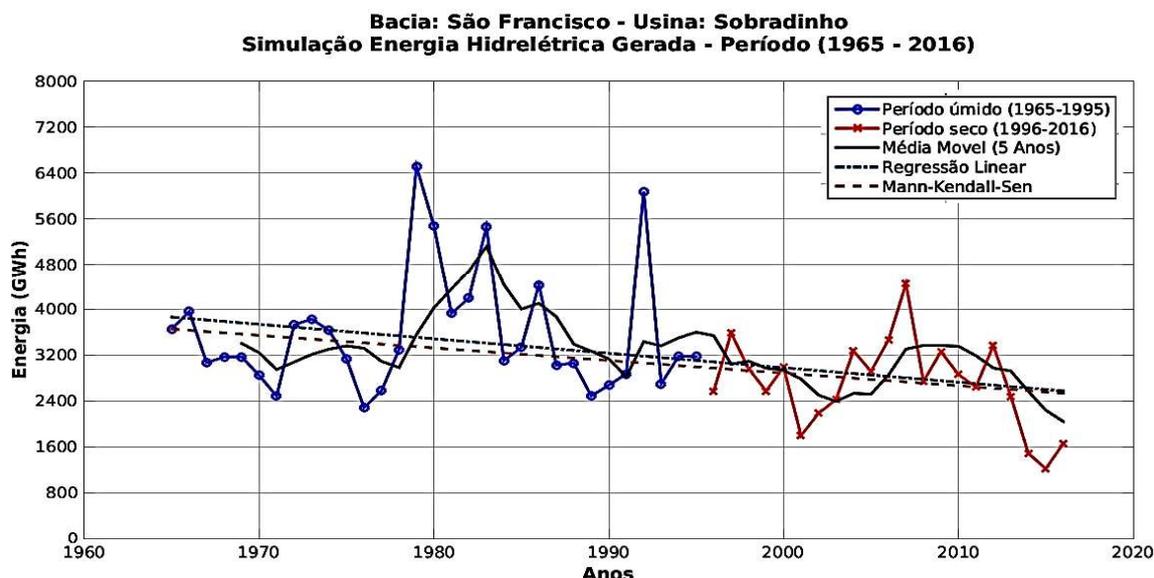


Figura 11. ENA gerada na usina de Sobradinho para ambas as fases da OMA, com base nos dados modelados de vazão defluente e volume do reservatório, para o período a partir de 1965.

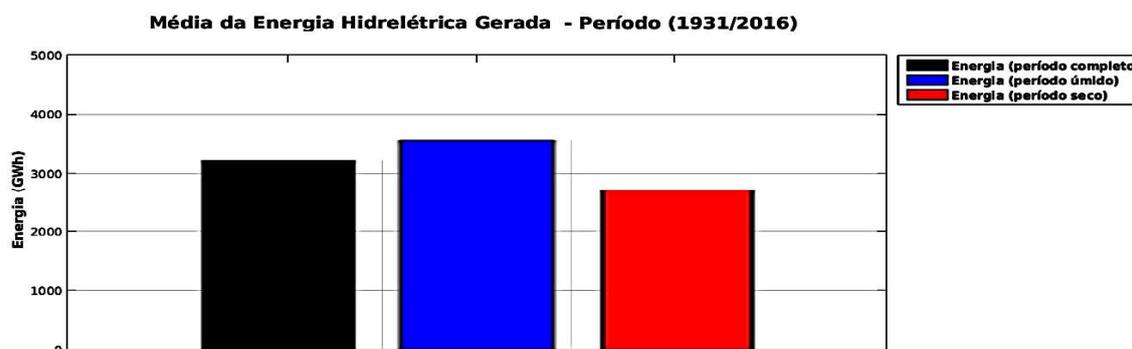


Figura 12. Média da ENA gerada em cada um dos períodos de análise da OMA com base nos dados modelados para a usina Sobradinho.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste estudo, é possível inferir que o fator climático pode impactar na gestão hídrica e geração hidrelétrica da usina Sobradinho. Com a análise quantitativa das séries temporais, foi possível pressupor que existe alguma influência do índice climático OMA com relação à precipitação e vazão, mantendo ou diminuindo quando em fase positiva ou aumentando em fase negativa. No entanto, vale ressaltar que outros fenômenos climáticos, como ODP e ENOS por exemplo, podem estar agindo e interferindo diretamente nessas variáveis hidrológicas, dificultando respostas mais concretas e conclusivas (Deser et al. 2012).

A análise quantitativa, por intermédio da análise do Espectro Global por Ondeletas (Wavelets), mostrou uma relação decadal (com picos no horizonte entre 32-64 anos) entre a vazão histórica em sobradinho e as anomalias da OMA. Esta conjectura demonstra possivelmente a interligação existente entre esses fenômenos climáticos e a disponibilidade hídrica na região do NEB para os seus mais diferentes usos.

As análises referentes à gestão dos recursos hídricos, mostrou que as curvas de permanência apresentaram valores maiores para o período frio da OMA, assim como a Q90, o que demonstra uma possível relação entre as fases desse fenômeno climático e a disponibilidade de água no reservatório de Sobradinho.

A geração de Energia Hidrelétrica em Sobradinho se mostrou afetada pelo fenômeno climático OMA, demonstrando um elevado nível de geração na fase fria, e um decaimento acentuado na fase quente. Essas informações tornam-se relevantes no horizonte de planejamento energético a médio e longo prazo, pois assim torna-se possível procurar antecipadamente fontes alternativas de geração de Energia que venham compensar as baixas nas hidrelétricas, e saber aproveitar de forma eficaz os momentos de alta.

Desse modo, é possível visualizar o panorama geral do nexos existente entre clima-água-energia, percebendo a interdependência destes através de suas conexões e influências, e analisando os impactos que estes fatores podem trazer à sociedade. Procurar entender esses processos e planejar-se para agir em momentos futuros adversos é primordial para a manutenção do desenvolvimento humano e garantia de qualidade de vida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (Projeto Clima, Água e Energia na Bacia do Rio São Francisco, processo nº 310286 / 2018-2). **SDG!**

REFERÊNCIAS

- ALVES, B. C. C.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. 2013. Análise de tendência e padrões de variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, **18**(4):19-34.
- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. 2003. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, **8**(2):149-160.
- COSTA, J. A. 2012. O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. **EDUCTE: Revista Científica do Instituto Federal de Alagoas**, **3**(1):71-82.

- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. 2008. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 13(1):111-124.
- DA COSTA, J. M. F. et al. 2018. Influência das mudanças climáticas, projetadas pelo IPCC, na aridez do Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, 11(3):429-442.
- DA SILVA, G. K. et al. 2020. Análise de projeções das mudanças climáticas sobre precipitação e temperatura nas regiões hidrográficas brasileiras para o século XXI. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, 1-17.
- DESER, C. et al. 2010. Sea surface temperature variability: patterns and mechanisms. **Annu. Rev. Marine. Sci.**, 2:115-43.
- DESER, C. et al. 2012. ENSO and Pacific decadal variability in the Community Climate System Model version 4. **Journal of Climate**, 25(8):2622-2651.
- DEWES, C. F.; DIAS, P. L. S. 2006. Análise e validação da variabilidade climática do modelo IPSL_CM4. In: ANAIS DO XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, SBMET, 2006, Florianópolis.
- DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M. 2016. Cenários de mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos na região Nordeste. **Revista Econômica do Nordeste**, 42(2):229-246.
- FENNESSEY, N.; VOGUEL, R. M. 1990. Regional flowduration curves for ungauged sites in Massachusetts. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 116(4):530-549.
- FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Manual do SIGA, 2015. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/87962788-Manual-do-siga-funceme-ce-brasil-2015.html>> Acesso em: ago. 2017.
- LIMA, J. R.; MAGALHÃES, A. R. 2019. Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. **Parcerias Estratégicas**, 23(46):191-212.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. 2004. Interdecadal and long term-variations of rainfall in the Amazon basin. **Theor. Appl. Climatol**, 78:79-96.
- MARENGO, J. A. et al. 2012. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, 32(1):1-21.
- MADERA, R. D. Q. 2013. **Modelagem da função de produção de uma usina hidrelétrica com base nas características individuais das unidades geradoras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 132p.
- MARCOS JUNIOR, A. D. et al. 2018. Classificação climática de Thornthwaite para o Brasil com base em cenários de mudanças climáticas do IPCC-AR5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 33(4):647-664.
- MARTINS, E. S. et al. 2018. A multimethod attribution analysis of the prolonged Northeast Brazil hydrometeorological drought (2012-16). **Bulletin of the American Meteorological Society**, 99(1):S65-S69.
- MEDEIROS, R. M. 2016. **Análise de aspectos climático, socioeconômico e ambiental e seus efeitos na bacia hidrográfica do rio Uruçuí Preto e entorno**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 155p.
- NOS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Mapas do SIN**. Disponível em: <http://apps05.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx#>. Acesso em: dez. 2017.
- PEREIRA, G. S.; CAVALCANTI, B. S. 2016. Siga: o novo sistema de suporte à decisão para gestão dos recursos hídricos. **Blucher Engineering Proceedings**, 3(2):449-456.
- ROTHAUSEN, S. G.; CONWAY, D. 2011. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. **Nature Climate Change**, 1(4):210-219.
- SCANLON, B. R.; DUNCAN, I.; REEDY, R. C. 2013. Drought and the water-energy nexus in Texas. **Environmental Research Letters**, 8(4): 045033.

- SILVA, F. de S. 2013. **Ondas atmosféricas equatorialmente confinadas e eventos de seca na região Nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências) - Universidade de São Paulo, 59p.
- SILVEIRA, C. S. et al. 2013. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região nordeste do Brasil, Amazônia e bacia da prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, **28**(3):317-330.
- SILVEIRA, C. S. et al. 2017. Monthly streamflow forecast for National Interconnected System (NIS) using Periodic Auto-regressive Endogenous Models (PAR) and Exogenous (PARX) with climate information. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos [online]**, **22**:e30.
- SILVEIRA, C. D. S. et al. 2019. Performance evaluation of AR5-CMIP5 models for the representation of seasonal and multi-annual variability of precipitation in Brazilian hydropower sector basins under RCP8. 5 scenario. **Hydrological Sciences Journal**, **64**(11):1279-1296.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, **79**(1):61-78.
- WENG, H.; LAU, K. M. 1994. Wavelets, period doubling, and time–frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific. **Journal of the atmospheric sciences**, **51**(17):2523-2541.

Submetido em: 06.07.2020

Aceito em: 04.07.2021