



GRUPO - VII

GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

UMA ANÁLISE CLIMÁTICA E ENERGÉTICA SOBRE AS REDUÇÕES DAS VAZÕES DO RIO SÃO FRANCISCO E SEU IMPACTO NO SIN

Madeira, P.D. (*)
Climatempo

Bezerra, B.V.
PSR

Kelman, R.
PSR

Mota, J.
Climatempo

Ramos, C.G.M.
Climatempo

RESUMO

O objetivo deste trabalho é trazer à tona a base atual do conhecimento do clima e da hidrologia da bacia do Rio São Francisco para compreender as causas que podem ter levado a mudança de padrão da vazão afluente do subsistema Nordeste, que na última década (2006-2015) teve uma redução de 40% da vazão mínima em relação à década de 1986-1995. Os fatores principais que contribuíram para o estabelecimento deste padrão de escassez são discutidos e suas implicações no Setor Elétrico Brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE

Rio São Francisco, Clima, vazão, TSM, modelo PAR (p)

1.0 - INTRODUÇÃO

As previsões de vazões afluentes de curto e longo prazo para os aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Interligado Nacional (SIN) são de extrema importância para o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos. Como aplicações, pode-se citar o controle de cheias, o gerenciamento de irrigação e operação de reservatórios de abastecimento de água, e a navegação, bem como os aspectos legais e institucionais relacionados ao gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos.

Na literatura existe uma vasta gama de métodos de previsão de vazões (5). Estes métodos podem ser divididos em dois grupos principais:

- (i) métodos que modelam matematicamente as relações físicas do processo de transformação de chuva-vazão; e
- (ii) métodos baseados nos dados históricos de vazão

No Brasil, as principais características das vazões afluentes são: (a) forte sazonalidade, com períodos úmidos marcados por maior variabilidade e períodos secos menos voláteis; (b) correlação mensal, causada principalmente pelo fenômeno físico do armazenamento da água nos aquíferos durante o período úmido (vazões elevadas no período úmido indicam boas condições hidrológicas no período seco); e (c) autocorrelação anual das vazões, fato importante para o planejamento de sistemas com regularização plurianual. O modelo de séries temporais PAR (p) (4) é capaz de produzir cenários de vazões com estas características, sendo utilizado na programação do despacho hidrotérmico do SIN desde a década de 1990. No caso específico do despacho hidrotérmico, para se determinar o montante de energia que será produzido por cada hidrelétrica no sistema, é fundamental quantificar o volume disponível futuro dos reservatórios (6). A utilização deste modelo é baseada na premissa que os registros hidrológicos de precipitação e de vazão são "estacionários", isto é, com as medições fluando em torno de um valor médio constante, e com dispersão homogênea. Com aplicação deste método são frequentes os resultados em que a vazão projetada sazonalmente convirja para Média de Longo Termo (MLT).

Contudo, é viável projetar o futuro ou revisar os projetos em funcionamento com alterações recentes do uso do solo e as mudanças climáticas, a partir de metodologias que empregam a premissa da estacionariedade das séries hidroclimáticas? Preliminarmente sabemos que não, uma vez que as energias afluentes do subsistema Nordeste nos últimos 24 anos (1993 a 2016) têm sido muito frequentemente abaixo da média histórica, exceto para o ano de 2009. Adicionalmente, desde 2013 as vazões afluentes à usina hidrelétrica (UHE) Sobradinho durante o período seco estão abaixo da defluência mínima do Rio São Francisco, forçando medidas de restrição e o deplecionamento do reservatório desta usina.

Neste trabalho pretende-se trazer à tona a base atual do conhecimento do clima e da hidrologia da região da Bacia do Rio São Francisco para compreender as causas que podem ter levado a mudança de padrão da vazão afluente do subsistema Nordeste, e assim indicar os fatores principais que contribuíram para o estabelecimento de um padrão de escassez não observado na hidroclimatologia da bacia, discutindo as implicações desta mudança no Setor Elétrico Brasileiro.

O capítulo 2 apresenta os dados e a metodologia, o capítulo 3 a análise dos resultados, o capítulo 4 as implicações no Setor Elétrico Brasileiro e o capítulo 5 conclui.

2.0 - DADOS E METODOLOGIA

Os dados de precipitação usados como referencia neste estudo são do Climate Prediction Center (CPC). Estes são dados baseados na análise global de precipitação, que é derivada exclusivamente de dados pluviométricos. Os dados diários foram convertidos em acumulados mensais para que fosse extraída a chuva média na área da Bacia do São Francisco. A média climatológica é calculada utilizando-se dados entre 1979 e 2016.

Os dados de vazão mensal entre 1979 e 2015 estão publicamente disponíveis online no site do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). As correlações são feitas seguindo a fórmula de Pearson.

3.0 - ANÁLISES E DISCUSSÕES

3.1 - Caracterização climática

Na FIGURA 1 abaixo, podemos observar a forte sazonalidade da chuva na Bacia do São Francisco. A região do Alto São Francisco possui o maior volume de chuva por área, com os volumes mais altos sendo observados entre novembro e março (primavera e verão). Os menores volumes são observados durante os meses de inverno quando a predominância é de pressões mais altas que dificultam o crescimento das nuvens de chuva. O mesmo padrão é observado na chuva integrada em toda a bacia (linha sólida preta da FIGURA 1) e na chuva integrada do Alto e Médio São Francisco (linha tracejada cinza da FIGURA 1).

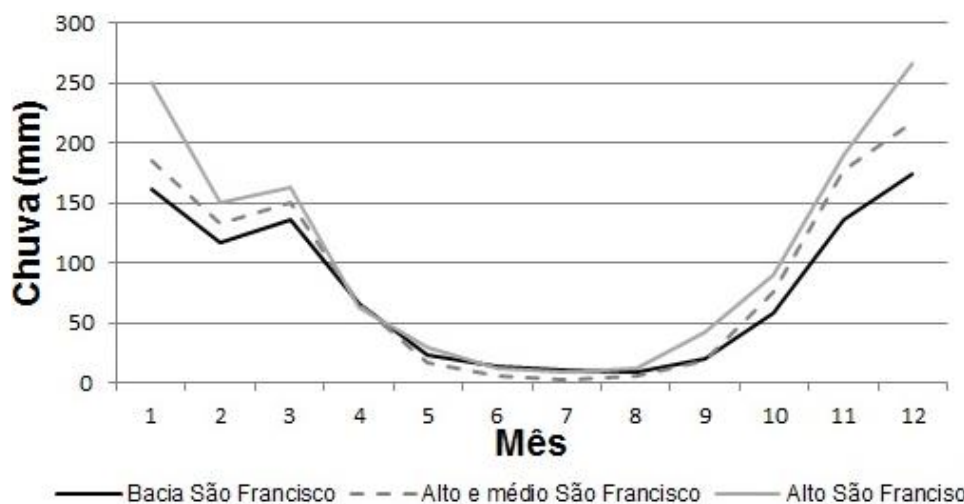


FIGURA 1 - Climatologia de chuva (mm) para as áreas integradas do Alto, Alto e Médio e Alto, Médio e Baixo São Francisco.

A década de 2006-2015 foi o período com maior redução das chuvas entre as décadas estudadas. Neste período a anomalia de precipitação negativa apresentou quase o dobro de frequência para as menores classes, enquanto a anomalia de precipitação negativa no Alto ao Baixo Rio São Francisco foi recorrentemente menor (FIGURA 2).

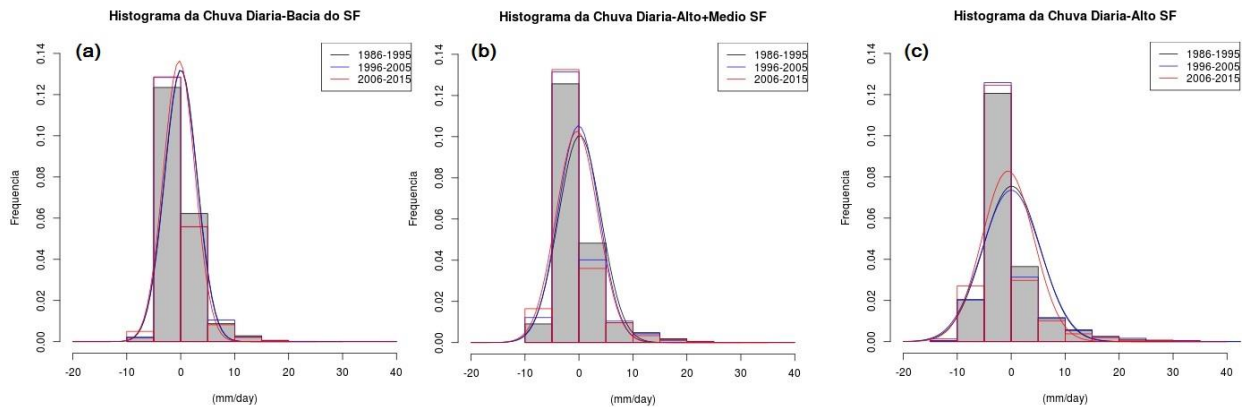


FIGURA 2 – Histogramas da anomalia de chuva diária nas décadas de 1986-1995, 1996-2005 e 2006-2015 calculada: (a) na área da bacia do Rio São Francisco, (b) na área do Alto e Médio Rio São Francisco e (c) no Alto Rio São Francisco.

Já as vazões apresentaram padrões semelhantes, com significativa sazonalidade para Xingó, Sobradinho e Três Marias como podem observar na FIGURA 3. Os meses de maiores volumes ficam entre dezembro e abril e os menores volumes acontecem entre os meses de julho e outubro, indicando assim um tempo de resposta da transformação da chuva em vazão, observado com maior ênfase nas grandes bacias.

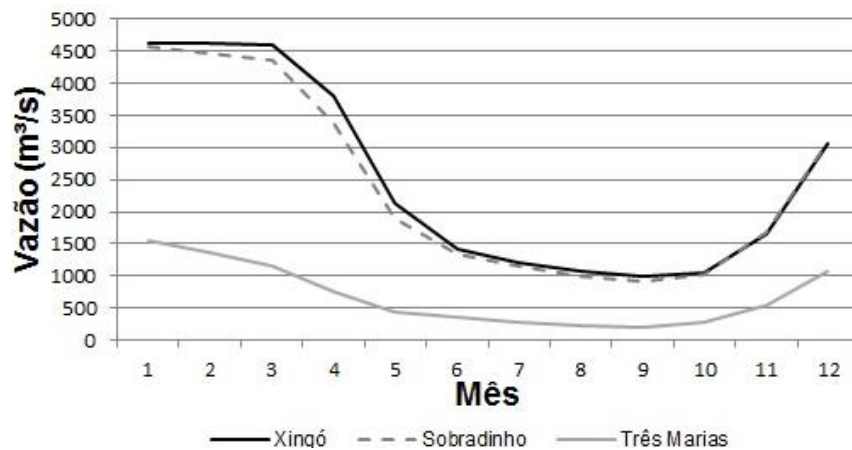


FIGURA 3 – Vazão média mensal (m^3/s) para nas sub-bacias Xingó, Sobradinho e Três Marias.

A vazão mínima, considerada aqui como percentil de 5% da vazão diária, vem sendo reduzida ao longo das três últimas décadas. O período de maior escassez foi de 2006-2015. A queda da vazão mínima neste período em relação as décadas de 1986-1995 e 1996-2005 foi aproximadamente 39% e 17% no Alto Rio São Francisco, e 41% e 14% no Baixo Rio São Francisco, respectivamente (TABELA 1).

A mudança da chuva e da vazão diária no Alto, médio e Baixo São Francisco nas décadas de 1986 a 2015 levanta a questão da não estacionariedade das séries de chuva e vazão. Embora a extensão da série analisada não seja suficientemente ideal, reduções entre 17 e 41% são significativamente elevadas, o que torna difícil defender a estacionariedade temporal da chuva e vazão na bacia do Rio São Francisco. Por fim, vale ressaltar que uma avaliação mais profunda é necessária, já que as vazões possuem intervenção humana no seu controle a partir dos reservatórios.

TABELA 1 – Vazão mínima, calculada a partir do percentil de 5% da vazão diária em no Alto (Três Marias), Médio (Sobradinho) e Baixo (Xingó) Rio São Francisco nas últimas três décadas (1986-2015).

Sub-bacias	1986-1995	1996-2005	2006-2015
Três Marias	143	105,5	87,7
Sobradinho	835,5	615	524,9
Xingó	917,5	629	541

O padrão cíclico das correlações é fato importante para o planejamento em sistemas com regularização plurianual. Podemos observar na FIGURA 4 que a chuva no alto São Francisco mostra elevada correlação com a vazão em Três Marias já no mês de ocorrência, no entanto, o tempo de viagem até Sobradinho e Xingó mostra defasagem de um mês no tempo de resposta. A análise dos dados diários pode mostrar tempo de resposta inferior ao mensal.

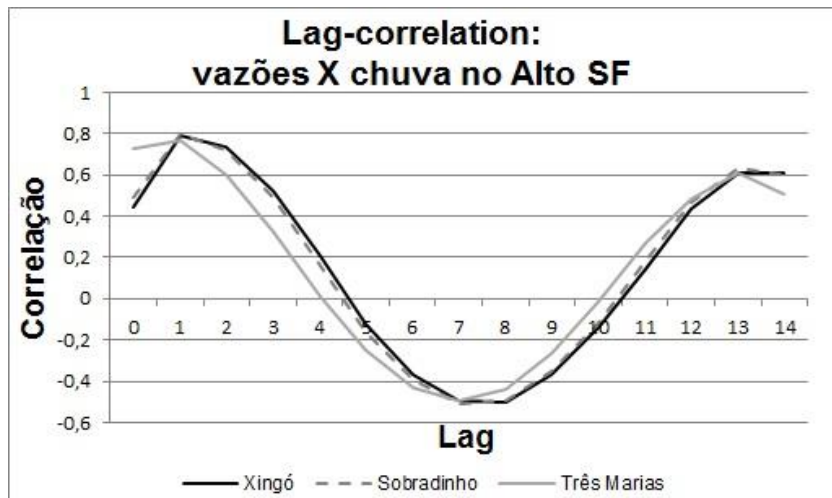


FIGURA 4 – Lag correlation entre a chuva no alto São Francisco e as vazões em Três Marias, Sobradinho e Xingó

A chuva ocorrida na área do Alto São Francisco é climatologicamente mais elevada que a chuva que cai sobre as áreas do médio e baixo São Francisco, com isso, a análise de correlação da chuva sobre toda a área da bacia e da vazão em Xingó segue o mesmo padrão, com um mês de tempo de resposta.

O subsistema Nordeste é majoritariamente composto pela bacia do Rio São Francisco, com isso, fez-se a análise, apresentada na FIGURA 5, da energia armazenada em MW/mês com a chuva ocorrida na área da bacia, nas regiões do alto e médio São Francisco e do alto São Francisco.

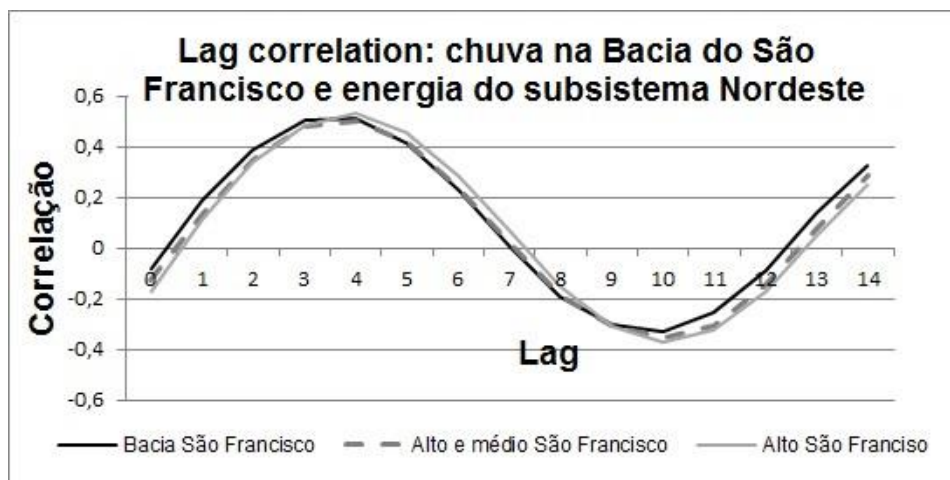


FIGURA 5 – Lag-correlation entre a chuva e a energia (MW/mes) do subsistema Nordeste.

Observa-se que a resposta da chuva ao armazenamento de energia apresenta máximo de correlação positiva com quatro meses de defasagem e o mínimo de armazenamento acontece no décimo mês após a ocorrência da precipitação.

3.2 - Relação entre a TSM (Temperatura da Superfície do Mar) e vazão no Rio São Francisco

O fenômeno ENSO (El Niño – Oscilação Sul) exerce grande influência sobre os padrões de circulação gerais da atmosfera, tendo grande influência sobre o posicionamento dos sistemas inibidores e favorecedores de chuva. No entanto, a variabilidade da vazão anual na bacia do Rio São Francisco não possui uma associação direta com anomalia da TSM na região do Niño 3 do oceano Pacífico Equatorial (e as regiões Niño 3.4 e Niño 4 também, embora não mostradas neste trabalho).

Os anos com a TSM anormalmente quente ou fria não estão relacionados com padrão de diminuição ou acréscimo da vazão natural anual, respectivamente, nem com o seu acréscimo ou redução. Na FIGURA 6 são apresentadas as

anomalias da vazão natural média anual no ano hidrológico (Nov - Out) afluente aos reservatórios de Três Marias, Sobradinho e Xingó; e as anomalias acumuladas da TSM na região do Niño 3 durante os trimestres de Set-Nov (SON), Dez-Fev (DJF), Mar-Mai (MAM) e Jun-Ago (JJA).

Percebemos que os anos onde a vazão anual foi superior ou inferior à média não correspondeu a um sinal sistemático da anomalia da TSM, seja para um padrão de La Niña ou de El Niño, respectivamente, ou um padrão inverso da anomalia da TSM.

De maneira geral, a anomalia negativa da vazão anual correspondeu a um leve acréscimo da anomalia da TSM do trimestre de Set-Nov do ano anterior e aos demais trimestres do ano corrente, salvo a exceção do período a partir de 2011, onde o padrão da TSM foi anormalmente quente com a vazão anual predominantemente abaixo da média. Em um outro estudo sobre as relações da TSM e vazão natural na bacia do Rio São Francisco os autores Galvêncio e Sousa (2002) reportaram que o fenômeno El Niño e La Niña não contribui para reduzir e aumentar a vazão na bacia do Rio São Francisco, respectivamente.

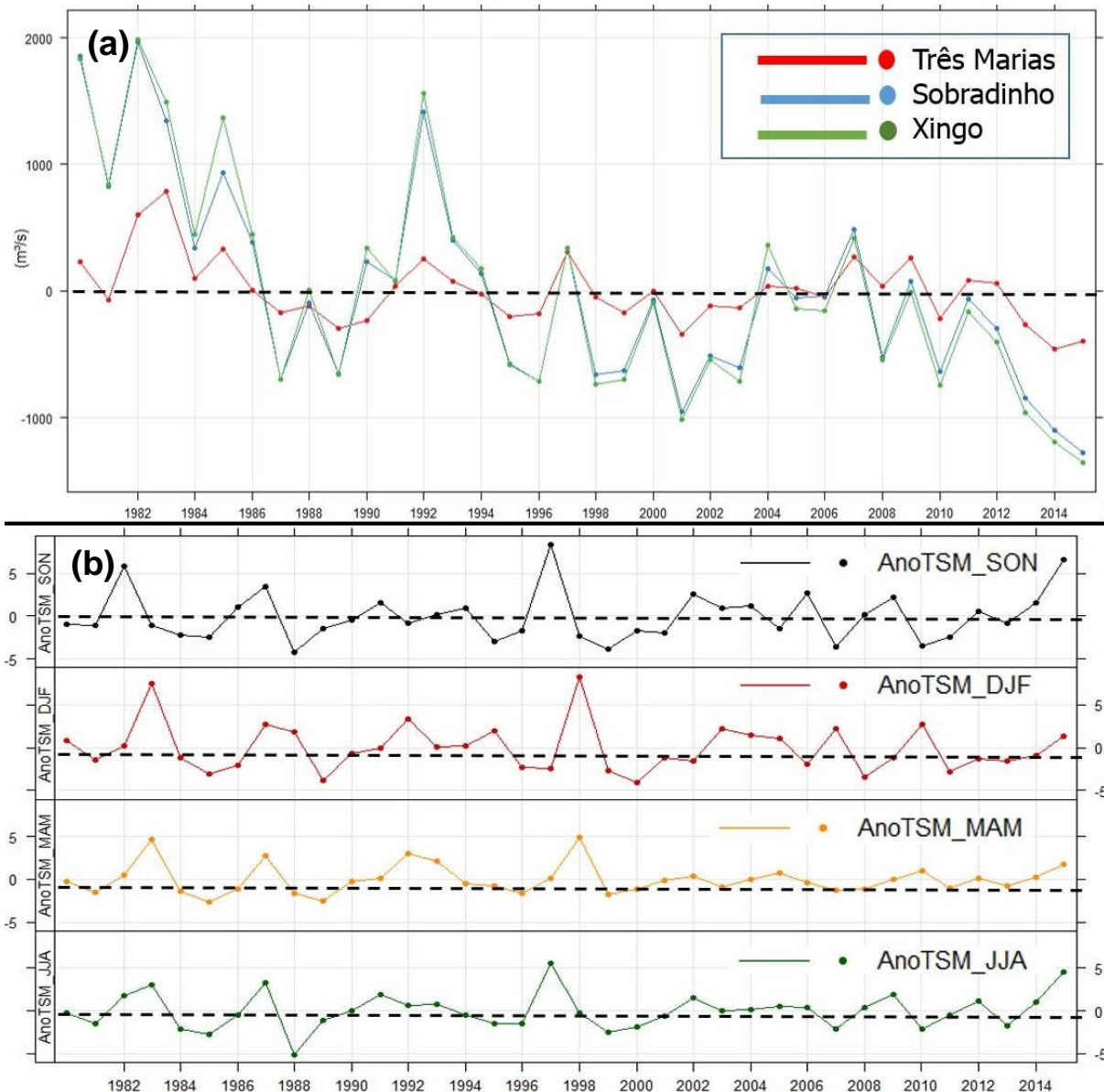


FIGURA 6 - Anomalias da: (a) vazão média anual durante o ano hidrológico (Nov a Set) da vazão natural afluente aos reservatórios de Três Marias, Sobradinho e Xingó; (b) e da TSM acumulada nos trimestres de Set-Nov (SON), Dez-Fev (DJF), Mar-Mai (MAM) e Jun-Ago (JJA) na região do Niño3 do Oceano Pacífico equatorial.

Nas FIGURA 7 e FIGURA 8 - Idem à FIGURA 7, são apresentadas a dispersão da vazão natural média anual no ano hidrológico (Nov-Set) afluentes aos reservatórios de Três Marias e Xingó contra a anomalia acumulada da TSM na região do Niño 3 trimestralmente. Observamos que em ambos os reservatórios os modos de variação da vazão anual e a anomalia da TSM são dissociados, com a dispersão dos pontos distante da reta e com os coeficientes de

determinação (r^2) inferiores a 0,1. Estes resultados são semelhantes para outras regiões equatoriais do oceano Pacífico, Niño 3.4 e Niño 4, e para o dipolo do oceano Atlântico (não mostrado).

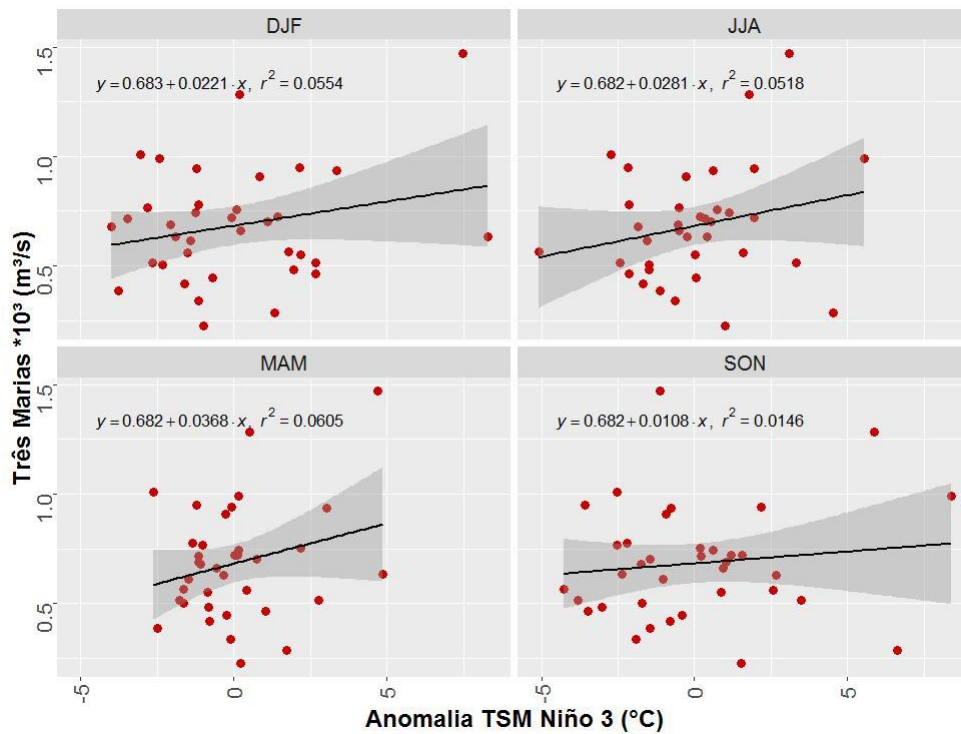


FIGURA 7 - Dispersão durante os anos de 1980-2015 da vazão natural média anual no ano hidrológico (Nov-Set) afluente ao reservatório de Três Marias e anomalia acumulada da TSM na região do Niño 3 do oceano Pacífico Equatorial nos trimestres de: (a) Dez-Fev (DJF), (b) Jun-Ago (JJA), (c) Mar-Mai (MAM) e (d) Set-Nov (SON). Nos painéis são apresentadas as equações de regressão linear e os coeficientes de determinação da reta de regressão (r^2).

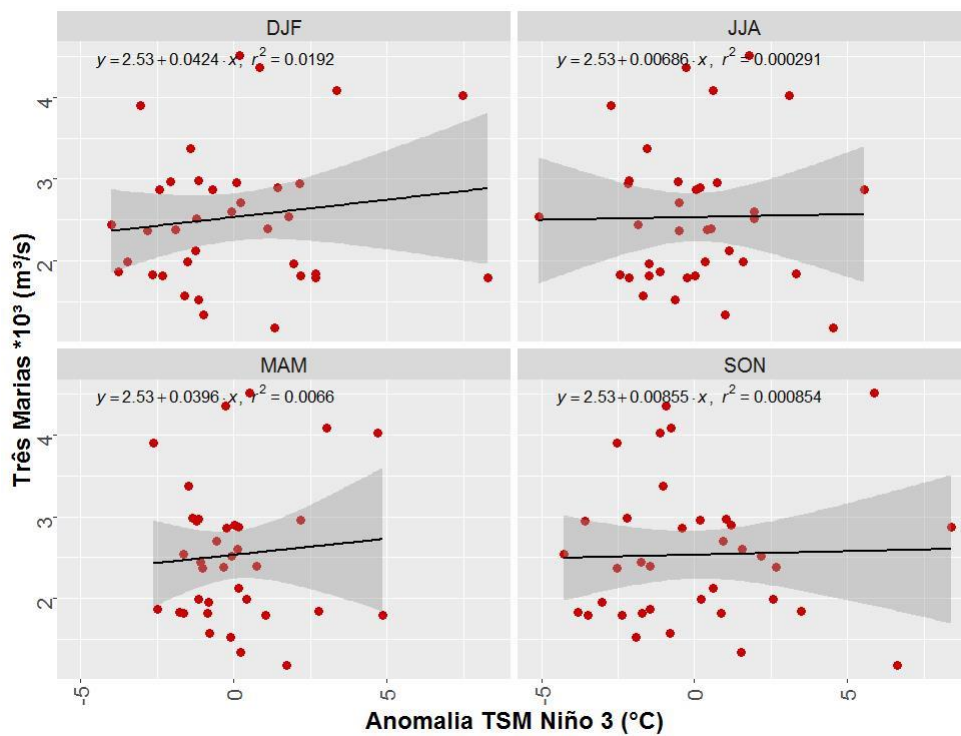


FIGURA 8 - Idem à FIGURA 7, mas para vazão natural afluente ao reservatório de Xingó.

4.0 - IMPLICAÇÕES NO SETOR ELÉTRICO

4.1 - Utilização do PAR(p) no despacho hidrotérmico

O fato das séries históricas de vazão no nordeste não serem estacionárias tem colocado dúvidas no setor elétrico sobre a utilização do modelo PAR(p) para o despacho hidrotérmico. Por exemplo, um relatório divulgado pelo ONS (7) aponta para a análise de segurança de suprimento do sistema sem considerar a tendência hidrológica no modelo PAR(p). É claro que este tipo de abordagem apenas amplifica o problema, conforme mostrado na Figura 9. Observa-se que fazer projeções ignorando a tendência hidrológica geram vazões ainda mais irrealistas. As vazões durante o período seco de 2016 foram mais próximas da projeção com tendência.

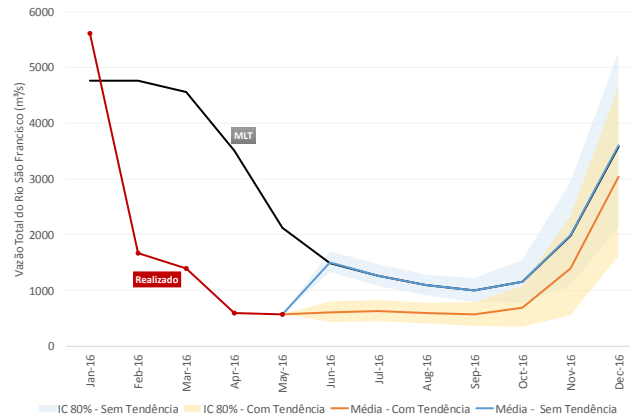


FIGURA 9 - Comparação de projeções do modelo PAR(p) com e sem tendência hidrológica

4.2 - Impactos para o planejamento da operação e da expansão

A utilização de vazões irrealista na programação da operação e, conseqüentemente, no cálculo do valor da água leva a decisões sub-ótimas, com conseqüências comerciais. Como o modelo hidrológico acredita que as vazões irão convergir para a MLT nos próximos meses, o despacho por ordem de mérito das termelétricas e das importações da região Nordeste são menores do que o necessário. O resultado na prática é a decisão de geração termelétrica fora da ordem de mérito e, em alguns casos, inversão do fluxo dos intercâmbios energéticos, resultando no fenômeno do excedente financeiro negativo¹. Nestes casos ocorre aumento do ESS e da exposição das hidrelétricas ao risco hidrológico.

A utilização de um modelo hidrológico estacionário também possui reflexos na expansão do sistema. A razão é que a garantia física das usinas, que é o instrumento para garantia adequabilidade de suprimento (2), está sobre dimensionada, resultando em sub dimensionamento da necessidade de expansão do sistema e perda de sinal locacional para esta expansão. O primeiro fenômeno ocorre porque a garantia física total das hidrelétricas, conhecida como bloco hidráulico, é calculada considerando uma simulação do sistema com vazões geradas pelo modelo PAR(p) que convergem para a MLT, resultando em sobre dimensionamento deste valor. Já a perda do sinal locacional ocorre porque o rateio do bloco hidráulico entre as hidrelétricas é feito pela energia firme (3), que é a produção das usinas simuladas durante o período crítico (1949-1956). Como as vazões observadas nos últimos anos são bem menores que as do período crítico, a garantia física das hidrelétricas da região nordeste estaria sobre estimada.

4.3 - Alternativas de solução utilizando o modelo PAR(p)

É necessário representar no modelo o fato de que as vazões medidas nas últimas duas décadas têm características estatísticas diferentes das vazões nas décadas anteriores. A razão para este cuidado é que este tipo de modelo tem como premissa que o processo estocástico é estacionário, isto é, que não há mudanças nos parâmetros básicos do modelo (média, desvio padrão etc.) ao longo do tempo. Há duas técnicas para preservar a premissa de que o processo é estacionário: (i) corrigir (no caso, aumentar) a estimativa de retirada de água a montante de Sobradinho usando como critério a coerência estatística das vazões ao longo de todo o histórico, isto é, de maneira que a probabilidade de aflúências acima e abaixo da MLT sejam aproximadamente 50%, como esperado; ou (ii) estimar os parâmetros do modelo PAR(p) utilizando apenas o período 1993-2015.

A primeira técnica tem como vantagem não descartar as medidas de vazões anteriores a 1993. Já a segunda técnica possui como vantagem ajustar também o desvio padrão das vazões, que pode ter se alterado nos últimos anos devido, por exemplo, a mudanças no uso do solo.

¹ O excedente financeiro negativo ocorre quando o fluxo na linha ocorre do subsistema com maior PLD para o subsistema com menor PLD, o que é contrário a lógica econômica. Este fenômeno ocorreu no passado pois os modelos de despacho hidrotérmico indicavam a exportação de energia no Nordeste para o Sudeste, devido a projeção de vazões próximas a média nos meses subsequentes, o que nunca ocorreu.

A figura a seguir compara as projeções dos próximos 12 meses obtidas a partir destas diferentes técnicas. Observa-se que as médias são bastante próximas, porém a dispersão das projeções considerando o histórico mais recente é bem menor.

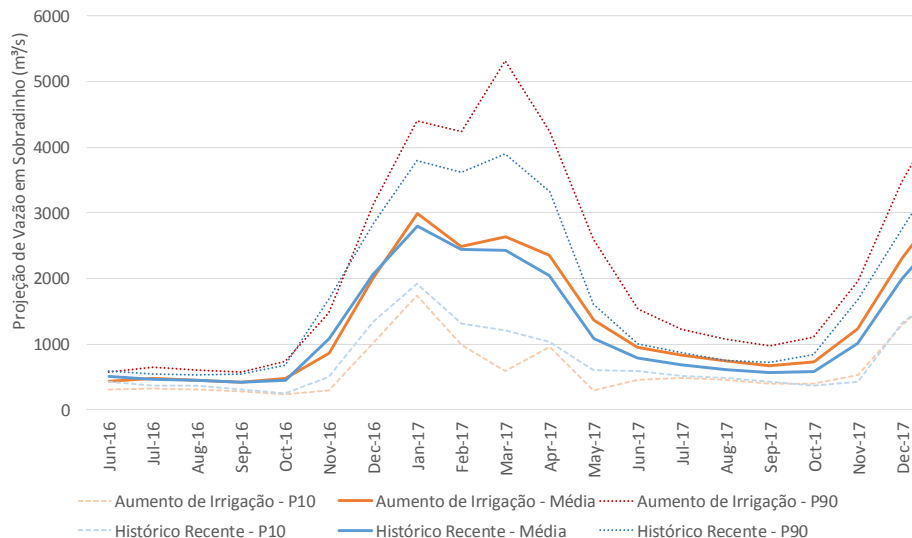


FIGURA 10 – Projeção de vazões utilizando aumento da irrigação no NE e apenas o histórico recente

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou que os padrões de chuva e vazão da bacia do Rio São Francisco apresentam forte sazonalidade, com períodos úmidos e secos bem definidos, sendo que o volume maior da chuva ocorre na região do Alto Rio São Francisco. Foram mostrados também que a variabilidade de chuva e vazão sobre a bacia não apresenta relação direta com a TSM nas regiões do Niño 3, 3.4 e 4. De maneira geral, o padrão hidroclimático da bacia na última década (2006-2015) apresentou uma redução na vazão mínima de até 40% em relação à década de 1986-1995 com significativas reduções da chuva nas regiões de cabeceira da bacia. Esta redução pode estar associada ao ciclo da variabilidade natural da bacia, intensificada ou não pelas mudanças climáticas e uso da terra.

Contudo, uma investigação mais profunda deve ser realizada para confirmar estas hipóteses, considerando também os efeitos das intervenções no controle das descargas a jusante dos reservatórios, que corroboram na redução das vazões.

O fato de o Brasil ter experimentado ao longo dos últimos anos vazões extremamente baixas não significa que o modelo PAR(p) deva ser rejeitado e, muito menos, que devemos passar a realizar análises energéticas sem tendência hidrológica, ou apenas com as séries históricas. Por exemplo, análises com séries históricas são importantes para analisar o comportamento do sistema em determinadas situações, como por exemplo o que acontece com o sistema na ocorrência da pior série do histórico, em um ano de El Niño, etc (análises conhecidas como what if), mas devem ser complementares às avaliações com os modelos sintéticos com tendência hidrológica. O importante neste caso é fazer ajustes no modelo PAR(p) para convergir as projeções de vazões no longo prazo para valores mais realistas.

Finalmente, cabe ressaltar que o modelo PAR(p) possui uma série de deficiências que não foram analisadas neste artigo, como por exemplo, a não representação das não linearidades observadas na correlação temporal e na correlação entre as usinas; o processo de atraso ou antecipação do período úmido, e a dependência com variáveis exógenas, como por exemplo a anomalia de TSM.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) Galvêncio, J. D. and Sousa, F. A. S. 2002: *Relação entre o fenômeno El Niño e os totais precipitados na bacia hidrográfica do Rio São Francisco*. **RBRH** 7:113-19
- (2) Ávila, P., Bezerra, B., Barroso, L. A., Granville, S., Pereira, M. V., "Cálculo da Garantia Física Total do Sistema Considerando Restrições de Aversão ao Risco na Política Operativa", Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, Outubro de 2013.
- (3) Ávila, P., Bezerra, B., Barroso, L. A., Granville, S., Pereira, M. V., Domingues, D., Araújo, V.V., "Alocação de Garantia Física de Usinas Geradores através do Método do Benefício Marginal: Valorização Econômica do

Benefício de Regularização a Montante”, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, Outubro de 2013.

(4) Maceira, M. E. P., Kelman, J., Damázio, “Utilização de modelos PAR para a simulação e previsão de séries hidrológicas mensais”, VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, ABRH, Salvador, 1987.

(5) Wang, W. “Stochasticity, nonlinearity and forecasting of streamflow processes”. IOS Press, 2006.

(6) M. V. Pereira and L. M. V. G. Pinto, “Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning”. Mathematical Programming, 52:359-375, 1991.

(7) ONS, “Relatório Executivo PMO de março de 2014 – REV0”, março de 2014.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Patrícia Diehl Madeira – São Paulo, SP – 1967.

Graduação – UFRJ – Bacharel em meteorologia – 1991.

Pós-Graduação – USP - Mestre em Ciências Atmosféricas – 1995.

Lattes - <http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizacv.do?id=K4784544P5>

Possui graduação em Meteorologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1991) e mestrado em Meteorologia pela Universidade de São Paulo (1995). Parte do mestrado (1993) foi cumprido no Kernforschungszentrum, em Karlsruhe - Alemanha. Atualmente é meteorologista/sócia da Agência Climatempo. Atendeu ao MBA executivo em Marketing pelo Madia Marketing School (2009) e o MBA em Gestão de Negócios, Comércio e Operações (2011/2012) na Fundação Instituto de Administração (FIA), vinculada à Universidade de São Paulo. Possui ampla experiência em avaliação de ferramentas meteorológicas, previsão do tempo e do clima, monitoramento e alertas meteorológicos, e atendimento aos diversos veículos de comunicação/imprensa. Desde 2010 se dedica às atribuições de diretoria do departamento de Meteorologia da Climatempo Meteorologia.

Bernardo V. Bezerra é doutor em Engenharia Elétrica e Diretor Técnico da PSR.

Rafael Kelman é doutor em Engenharia Elétrica e Diretor Executivo da PSR.

Jonathan Mota é doutor em Ciências Atmosféricas e atua na área de hidrologia da Climatempo.

Camila Gomes Martins Ramos é mestre em Ciências Atmosféricas e é integrante do grupo especialista em energia da Climatempo.