

# Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL



## Relatório Técnico

**Nº/Ano:** 2130/2019      **Nº de Páginas:** 31      **Nº de Anexos:**

**Título:** Discussão das propostas de representação da variável hidrológica no SIN apresentadas no Workshop "ALTERAÇÕES DE PADRÕES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS E AVALIAÇÃO DA MELHOR REPRESENTAÇÃO ENERGÉTICA DE SÉRIES DE VAZÕES NATURAIS".

**Departamento:** Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

**Área de Responsabilidade:** B200      **Conta de Apropriação:** 1888

**Cliente:**  
Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico - CPAMP

**Resumo:**  
O objetivo deste relatório é discutir as propostas de representação da variável hidrológica no SIN apresentadas no Workshop "ALTERAÇÕES DE PADRÕES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS E AVALIAÇÃO DA MELHOR REPRESENTAÇÃO ENERGÉTICA DE SÉRIES DE VAZÕES NATURAIS" em 30 e 31 de Outubro de 2017.

**Autores:**  
Maria Elvira Piñeiro Maceira - Cepel  
Jorge Machado Damázio - Cepel  
Fernanda da Serra Costa - Cepel  
Luciano Nóbrega R. Xavier - Cepel  
Débora Dias Jardim Penna - Cepel

**Palavras-Chave:**  
Mudanças Climáticas, Modelagem Hidrológica, Variabilidade Climática, Setor Elétrico Brasileiro

**Classificação:** CONTROLADO

### Gerentes dos Projetos

**Nome:** Maria Elvira Piñeiro Maceira  
**Tel.:** 21-2598-6454  
**E-mail:** [elvira@cepel.br](mailto:elvira@cepel.br)

### Chefe do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente

**Nome:** André Luiz Diniz Souto Lima  
**Tel.:** 21-2598-6046

**E-mail:** [diniz@cepel.br](mailto:diniz@cepel.br)

### Aprovação

  
**Raul Balbi Soltero**  
Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

28/10/2019

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL      www.cepel.br  
Sede: Av. Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária - CEP 21941-911 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil - Tel.: 21 2598-6000 - Fax: 21 2260-1340  
Unidade Adrianópolis: Av. Olinda, 5800 - Adrianópolis - CEP 26053-121 - Nova Iguaçu - RJ - Brasil - Tel.: 21 2666-6200 - Fax: 21 2667-3518  
Endereço Postal: CEPEL Caixa Postal 68007 - CEP 21944-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil / Endereço Eletrônico: [cepel@cepel.br](mailto:cepel@cepel.br)

## **Relatório Técnico**

**Discussão das propostas de representação da variável hidrológica no SIN apresentadas no Workshop “*ALTERAÇÕES DE PADRÕES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS E AVALIAÇÃO DA MELHOR REPRESENTAÇÃO ENERGÉTICA DE SÉRIES DE VAZÕES NATURAIS*”**

**Realizado em 30 e 31 de Outubro de 2017**

**Março/2019**

### Conteúdo

1. Introdução	4
2. Síntese e comentários gerais	6
2.1 Avaliação do Comportamento das Séries Históricas de Afluências Naturais do SIN	6
2.2 Alterações de Oferta e Demanda Hídrica	8
2.3 Alterações de padrões climáticos - passado recente e ao longo do século XXI	10
2.4 Análise de Custo-benefício de medidas de adaptação à mudança do clima no Piancó-Piranhas-Açu	12
2.5 Impactos de Mudanças Climáticas na Hidrologia - Estudos do IPH-UFRGS	13
2.6 Estudos Desenvolvidos no Âmbito do Planejamento	15
2.7 Representação Fasorial e Espaço de Estado na Projeção de ENA por Redes Neurais Artificiais	16
2.8 A relevância da modelagem hidroenergética sobre aspectos regulatórios do setor elétrico brasileiro	19
2.9 Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos	20
2.10 Modelagem Estocástica de Vazões Naturais – Representação de Variáveis de Tempo e Clima	22
2.11 Alterações de Padrões Climáticos e hidrológicos e avaliação da melhor representação energética de séries de vazões naturais	25
2.12 Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e Avaliação da Melhor Representação Energética de Séries de Vazões Naturais	28
2.13 Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e Avaliação da Melhor Representação Energética de Séries De Vazões Naturais - Experiência da Academia	30
3. Conclusões	32

## 1. Introdução

O Workshop “Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e Avaliação da Melhor Representação Energética de Séries de Vazões Naturais” realizado de 30 a 31 de outubro de 2017, foi proposto e organizado pelas instituições participantes do GT-Metodologia da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP/MME).

A motivação deste Evento foi o conjunto de debates suscitados pelos resultados divulgados de forma continuada pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) e estudos preliminares de avaliação dos impactos das mudanças climáticas no Setor Elétrico Brasileiro (SEB). Adicionalmente, também contribuiu a sequência de afluições muito baixas verificadas nos últimos anos na bacia do rio São Francisco.

O objetivo do Workshop foi o de conhecer e debater as visões e estudos divulgados pela academia, consultoria e órgãos de governo sobre a temática em epígrafe à época. Durante o evento, foram realizadas 14 apresentações; no primeiro dia, as apresentações se concentraram na temática de “Hidrologia e Clima”, e o segundo dia foi voltado para a modelagem energética. Na Tabela 1 são listadas as apresentações realizadas no Workshop.

**Tabela 1 – Entidades e Título das Apresentações**

	<b>Título</b>	<b>Entidades</b>
1	Avaliação do Comportamento das Séries Históricas de Afluições Naturais do SIN	ONS
2	Alterações de Oferta e Demanda Hídrica	ANA
3	Alterações de padrões climáticos - passado recente e ao longo do século XXI	CPTEC/INPE
4	Análise de Custo-benefício de medidas de adaptação à mudança do clima no Piancó-Piranhas-Açu	FGV-SP
5	Impactos de Mudanças Climáticas na Hidrologia	UFRGS
6	Gerenciamento do Risco Climático em Múltiplas Escalas Temporais <sup>1</sup>	UFC
7	Estudos Desenvolvidos no Âmbito do Planejamento	EPE
8	Representação Fasorial e Espaço de Estado na Projeção de ENA por Redes Neurais Artificiais	CCEE
9	A relevância da modelagem hidroenergética sobre aspectos regulatórios do setor elétrico brasileiro	ANEEL
10	Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos	MME
11	Modelagem Estocástica de Vazões Naturais – Representação de Variáveis de Tempo e Clima	CEPEL
12	Alterações de padrões climáticos e hidrológicos e Avaliação da melhor representação energética de séries de vazões naturais	UNB
13	Alterações de padrões climáticos e hidrológicos e Avaliação da melhor	PSR

<sup>1</sup> O arquivo referente a esta apresentação não estava disponível durante a elaboração deste Relatório.

---

	Título	Entidades
	representação energética de séries de vazões naturais	
14	Alterações de padrões climáticos e hidrológicos e Avaliação da melhor representação energética de séries de vazões naturais	PPE/COPPE

Este Relatório fornece uma síntese de cada apresentação e os pontos mais relevantes e promissores para a identificação de alterações nos padrões climáticos e hidrológicos e da melhor forma de representá-los nos modelos adotados no SEB.

## 2. Síntese e comentários gerais

### 2.1 Avaliação do Comportamento das Séries Históricas de Afluências Naturais do SIN

Apresentadores: Eduardo França e Rogério Saturnino Braga

Instituição: Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS

A apresentação do ONS foi feita em duas partes: (i) Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e (ii) Tendências em Séries de Vazões Naturais.

#### ***Alterações de Padrões Climáticos***

Nesta parte apresentou-se inicialmente uma revisão das investigações sobre a sequência de vazões abaixo da MLT ocorridas no São Francisco e em bacias próximas desde 1993, e em particular da sequência decrescente de 2013/2017. As conclusões foram que a causa da sequência decrescente de 2013/2017 seria a ocorrência de uma sequência de precipitações baixas nas bacias do Nordeste e nas bacias do Sudeste mais próximas. Observou-se que de 2013/2017 as outras bacias do Sistema Interligado Nacional (SIN) como um todo apresentaram vazões flutuando acima da MLT.

A seguir apresentou-se uma análise de verificação se estas sequências atípicas de vazões seriam fruto de variação ou uma mudança climática, tendo-se concluído por mudança climática, tendo em vista dois pontos:

Comparação das flutuações desde 1931 da série de Energias Naturais Afluentes (ENAs) resultantes de uma agregação em subsistemas das usinas do Nordeste e de parte do Sudeste (bacia2 na terminologia da apresentação) com as variações do indicador de clima Oscilação Decadal do Pacífico. A comparação não mostrou sincronia;

Simulações de projeções climáticas (projeto P&D ANEEL liderado por AES Tietê) para 2011/2040 de modelos de circulação geral da atmosfera com cenários de emissões de GEE indicaram as direções das flutuações verificadas (redução no Nordeste e aumento no Sul).

A apresentação termina com uma provocação: “Considerando o horizonte de cinco anos, há uma probabilidade maior da manutenção dos padrões de chuva/vazão dos últimos anos?”

A provocação aceita que um padrão inferido pela série dos últimos anos persistirá com alguma probabilidade nos 5 anos futuros.

### *Tendências em Séries de Vazões Naturais*

Esta apresentação reporta o resultado de testes estatísticos com as séries de vazões naturais anuais do SIN para verificação da hipótese nula de estacionariedade de valor central contra a hipótese alternativa de existência de tendências. Usou um conjunto menor de 64 séries, escolhidas como representativas. Foram utilizados inicialmente os testes não paramétricos Spearman-rho e Mann Kendall e de Tendência de Sen para verificar evidências de tendências. As 39 séries com alguma evidência (pelo menos um teste positivo) foram então analisadas pelo teste de Tendência de Sen para avaliação de sinal da tendência e significância. O teste de Sen indicou evidências significativas decrescentes em 11 series no Nordeste e Sudeste e crescentes em 23 séries no Sul.

A apresentação diz que o estudo está prosseguindo nos seguintes pontos:

- 1- Avaliar o tamanho máximo das séries que não apresenta tendências significativas;
- 2- Desenvolver uma metodologia que permita identificar a necessidade de alteração do tamanho das séries de vazões utilizadas nos processos de Planejamento e Programação da Operação de forma periódica.

### **Comentários Gerais**

De um modo geral, a apresentação sugere avaliações com o histórico de vazões reduzido, onde os anos mais antigos poderiam ser descartados. A identificação do ponto de corte do histórico é um desafio a ser investigado. Esta abordagem precisa levar em consideração a perda de informação com o descarte de parte da série histórica.

### 2.2 Alterações de Oferta e Demanda Hídrica

Apresentadores: Flavio Troger, Márcio Tavares Nóbrega e Saulo Aires de Souza

Instituição: Agência Nacional de Águas - ANA

A apresentação consistiu de uma exposição de diversas atividades desenvolvidas e em desenvolvimento na ANA relacionadas ao tema de Alterações de Oferta e Demanda Hídrica no Brasil. No tocante à oferta hídrica foram apresentados resultados de estudos de avaliação da estacionariedade da série de vazões afluentes mensais ao reservatório da UHE Sobradinho, objeto de projeto ANA/CAPES, e de dois trabalhos associados a mudanças climáticas: (i) avaliação de impactos na disponibilidade hídrica do rio Grande e (ii) estudos de adaptação do planejamento e operação dos recursos hídricos na bacia estendida do rio São Francisco. Com respeito à demanda hídrica, foram apresentados resultados de estudo detalhado de avaliação de usos consuntivos no Brasil.

A análise das séries de dados fluviométricos e pluviométricos na bacia do rio São Francisco levou à conclusão de que nos últimos 30 anos houve redução da vazão média no período seco, fato que foi atribuído à redução da chuva, também verificada no estudo, ao aumento dos usos consuntivos na bacia e a incertezas associadas ao processo de reconstituição da série de vazões naturais. Ressalta-se que os resultados referentes às reduções nas séries de chuva e vazão apresentaram significâncias distintas (10% e 50%, respectivamente).

A disponibilidade hídrica na bacia do rio Grande foi analisada a partir de registros históricos e avaliada no clima futuro segundo projeções de 20 modelos globais utilizados pelo IPCC. Após a remoção de viés das projeções de chuva com uso do mapeamento por quantil (quantile mapping), a chuva prevista no clima futuro (2010-2100) conforme dois cenários de emissão (RCP 4.5 e 8.5) foi analisada e comparada com os dados observados (1950-2005). Considerando a q7,10, a disponibilidade hídrica projetada na bacia não apresentou um resultado coerente já que parte dos modelos apontou tendência decrescente e parte, crescente.

Ações da ANA em conjunto com empresas do Setor Elétrico no tocante a operação de reservatórios considerando os usos múltiplos dos recursos hídricos foram destacadas na apresentação. Foram mencionados os casos das bacias do São Francisco e do Tocantins, nas quais a ANA participa de avaliações a respeito das regras de operação dos reservatórios a serem adotadas pelas empresas em situações de estresse hídrico.

Por fim, foram apresentados os resultados de projeto de reavaliação das vazões mensais de retirada, consumo e retorno associadas aos usos consuntivos no Brasil no período de 1930-2030. Para tal, foram considerados detalhadamente diversos tipos de uso, tais como o abastecimento urbano e rural, o consumo por diferentes setores (por exemplo, industrial, agricultura e de mineração) e a evaporação líquida em reservatórios. Os resultados



---

expostos mostraram mapas de evolução dos usos consuntivos no Brasil verificados em 1940 e 2013, e os valores projetados para 2030, além das séries de retirada, retorno e consumo totais em todo o período considerado. Os resultados evidenciaram o forte aumento dos usos consuntivos verificados na década de 1970, e que se projeta um contínuo aumento destes até 2030.

### ***Comentários Gerais***

A apresentação trouxe resultados interessantes, mas não indicou proposta nova para a consideração dos efeitos de variabilidade/mudança climática nas séries de vazões afluentes às usinas hidroelétricas representadas no planejamento da expansão e operação energética.

### 2.3 Alterações de padrões climáticos - passado recente e ao longo do século XXI

Apresentador: Gilvan Sampaio

Instituição: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE

A apresentação foi composta por cinco seções. A primeira seção começou com descrições do clima global dos sistemas Atmosfera e Oceanos e de suas interações, incluindo a influência sob o ponto de vista qualitativo de índices de larga-escala (ENSO, gradiente meridional de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical, Oscilação Decadal do Pacífico) no clima no Brasil. Ao final desta seção foram apresentados mapas da regressão da precipitação anual em índices de larga-escala na precipitação e temperatura do ar na superfície da terra na América do Sul.

Na segunda seção, apresentaram-se diversas figuras descrevendo as mudanças de clima verificadas no período recente. Por exemplo, apresentou-se um mapa da mudança de temperatura média do ar na superfície da Terra entre 1901 e 2012 onde se verifica que em boa parte do Brasil o aumento foi superior a 1.5 0C, enquanto na grande maioria do globo o aumento foi abaixo de 1.0 0C. Outro exemplo são os gráficos com evoluções temporais da temperatura do ar à superfície anuais e de trimestres desde 1940, e os mapas de evoluções temporais da distribuição espacial de temperaturas médias mensais para a América do Sul. Uma figura mostrou as tendências da precipitação média anual entre 1955 e 2004 subdividida em três zonas de latitudes (abaixo de 150S, entre 150 e 300 S e entre 300 e 450 S) indicando redução a norte, e aumento ao sul.

A terceira seção foi dedicada às mudanças de hidrologia. Inicialmente, foram apresentados os resultados de testes de significância de tendências de vazão anual, vazão máxima e mínima semestral de locais de usinas hidroelétricas no sudeste brasileiro. Seguiu-se uma discussão sobre a conexão entre aumento da temperatura do ar e o ciclo hidrológico diferenciando-se os efeitos em regiões secas e úmidas, sugerindo o aumento da frequência e intensidade das secas e cheias respectivamente.

A quarta seção mostrou evoluções do nível médio do mar, temperatura do mar e temperatura do ar à superfície na América do Sul. Foram apresentados diversos gráficos de aumento de emissões no mundo desde 1970.

A quinta seção dedicou-se às projeções para o Século XXI. Apresentou-se os fundamentos do estado da arte em modelagem numérica do sistema climático e descreve-se a evolução deste tipo de modelo desde a década de 1970. Foi explicado esquematicamente os passos principais adotados da aplicação destes modelos em estudo de vulnerabilidades, impactos e adaptações a mudanças climáticas através do uso de cenários de mudanças climáticas.

---

Foram apresentados exemplos da literatura referentes à projeções climáticas e hidrológicas para o século XXI de vários modelos usando diferentes cenários de evoluções das emissões.

### ***Comentários Gerais***

A apresentação trouxe resultados interessantes, mas não indicou proposta nova para a consideração dos efeitos de variabilidade/mudança climática nas séries de vazões afluentes às usinas hidroelétricas representadas no planejamento da expansão e operação energética.

### 2.4 Análise de Custo-benefício de medidas de adaptação à mudança do clima no Piancó-Piranhas-Açu

Apresentador: Alexandre Gross

Instituição: Centro de Estudos em Sustentabilidade – FGV EAESP

Na apresentação foi exposto o arcabouço metodológico adotado e os resultados obtidos no trabalho conjunto da FGV e ANA com vistas à avaliação de medidas de adaptação às mudanças climáticas na bacia do Piancó-Piranhas-Açu (PPA), pequena bacia do semi-árido integrante do Projeto de Integração da bacia do rio São Francisco (PISF).

A primeira etapa do estudo consistiu na avaliação do risco físico, caracterizado a partir da análise de cenários de oferta e demanda hídricas na região. Os cenários de oferta hídrica futuras foram gerados considerando três cenários climáticos consensuais ("árido", "extremos", "moderado") definidos a partir da distribuição de probabilidades das vazões futuras a dois reservatórios "estratégicos", estimada conforme um ensemble inicial de 42 membros (21 modelos globais e dois cenários de emissões). Os cenários de vazão foram avaliados em termos de frequência e intensidade e segundo cinco classes de eventos (de muito secos a muito chuvosos). A demanda hídrica futura foi considerada por meio de três cenários socioeconômicos ("estagnado", "acelerado", "tendencial"), que, em conjunto com os três cenários de oferta hídrica, configuraram um total de 9 cenários de risco físico; em quatro destes foi calculado o déficit incremental (com respeito ao cenário "sem mudanças climáticas") acumulado em 50 anos, que levariam a um déficit incremental de 14% (melhor caso) a 184% (pior caso).

Em seguida, foram apresentados sumariamente resultados de perda total para os três cenários climáticos considerados, calculada para cada setor usuário na região, que configuraram o risco climático total.

Por fim, avaliou-se a redução percentual do déficit hídrico e o conseqüente custo-benefício de 18 medidas de adaptação, das quais apresentaram os maiores valores as duas referentes ao PISF. Além disso, uma análise de sensibilidade efetuada (variando em 15% os cenários de oferta, os custos e as taxas de desconto) permitiu que as 18 medidas de adaptação fossem classificadas em 3 categorias ("no-regret", "low-regret" e "não-recomendável").

#### **Comentários Gerais**

A apresentação trouxe resultados interessantes, mas não indicou proposta nova para a consideração dos efeitos de variabilidade/mudança climática nas séries de vazões afluentes às usinas hidroelétricas representadas no planejamento da expansão e operação energética.

### 2.5 Impactos de Mudanças Climáticas na Hidrologia - Estudos do IPH-UFRGS

Apresentador: Walter Collischonn

Instituição: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

Nesta apresentação foi exposto um conjunto de trabalhos realizados e em andamento no grupo de modelagem hidrológica do IPH-UFRGS, com ênfase em três projetos nos quais foram avaliados os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos com o uso do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH.

O primeiro destes consistiu em um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) ANEEL com o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico de bacias de interesse do Setor Elétrico Brasileiro. Neste estudo, cujos principais resultados foram publicados no livro "Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica", foram adotados cenários de diversos modelos globais no período 2010-2100, além do modelo regional ETA (em duas resoluções espaciais). Na apresentação foram mostrados resultados referentes às variações projetadas nas vazões em diferentes bacias; em linhas gerais, esses resultados apontaram para um decréscimo nas vazões nas regiões Norte e Nordeste, e um acréscimo no Sul e na maior parte do Sudeste.

O segundo estudo apresentado mostrou resultados de avaliação das vazões futuras na bacia do rio Paraná, conforme projeções do modelo global inglês HadGEN-ES calculadas segundo o cenário de emissões RCP 4.5. As anomalias de vazão apresentadas indicaram um comportamento diferenciado nas diferentes regiões da bacia.

O terceiro projeto, oriundo de parceria entre a ANA e a CAPES, tem como objetivo a avaliação de impactos sobre os recursos hídricos a partir de cenários de mudança climática gerados pelo modelo ETA. Resultados de variação de vazão média obtidos a partir de projeções de diferentes modelos globais segundo o cenário de emissões RCP 8.5 foram apresentados; segundo comentado pelo expositor, esses resultados corroboraram os obtidos no Projeto de P&D ANEEL (o primeiro a ser apresentado).

Foram apresentados também resultados referentes a um fator de sensibilidade das vazões médias às variações climáticas no período 2010-2100 conforme determinado por diferentes modelos climáticos e obtidos para toda a América do Sul com a versão atual do modelo MGB-IPH. Por fim, cabe destacar a apresentação a menção a dois artigos referentes à análise de tendência considerando a autocorrelação das séries anuais e à importância de se considerar corretamente a evapotranspiração nos estudos de mudança climática.

### *Comentários Gerais*

A apresentação trouxe resultados interessantes, com destaque para a importância de considerar: (i) a autocorrelação nas análises de tendência das vazões anuais; (ii) estimativas mais precisas da evapotranspiração nos estudos de mudança climática.

### 2.6 Estudos Desenvolvidos no Âmbito do Planejamento

Apresentador: Renato Haddad Simões Machado

Instituição: Empresa de Pesquisa Energética - EPE

Foi apresentada a metodologia empregada na elaboração do Plano Decenal de Energia pela EPE. A EPE tem como objetivo apresentar explicitamente as incertezas que ainda não são tratadas nos modelos computacionais atualmente utilizados, tais como incertezas em: Expansão de Referência; Expansão para o Cenário de Demanda Alternativa; Expansão com Incerteza da Demanda; Redução do Custo para Solar Fotovoltaica; Restrição total para UHE's. Adicionalmente, elencou a importância de realizar avaliações de sensibilidade, como por exemplo, de mudanças na situação hídrica da região NE.

Foi apresentado também um quadro com estudos de adaptação do segmento de geração aos efeitos de mudanças climáticas por quatro referências. Destacou que a EPE está empreendendo esforços para possibilitar um aprofundamento sobre a adaptação do setor energético às mudanças climáticas.

#### ***Comentários Gerais***

A apresentação demonstrou a preocupação da EPE com as possíveis consequências das mudanças climáticas de longo prazo na expansão do sistema e está acompanhando trabalhos que estão sendo desenvolvidos no tema com o propósito de incorporar estratégias de adaptação no Plano Decenal de Energia. No entanto, não foi apresentada nenhuma proposta de metodologia.

## **2.7 Representação Fasorial e Espaço de Estado na Projeção de ENA por Redes Neurais Artificiais**

Apresentador: Rodrigo Sacchi

Instituição: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE

Esta apresentação teve como objetivo apresentar um conjunto de procedimentos atualmente utilizados pela CCEE para obter uma previsão de até 14 meses à frente para a variável energia natural afluyente aos reservatórios equivalentes do sistema interligado. A apresentação foi dividida em partes que trataram sobre o pré-processamento da série de vazões/ENA através de processamento digital de sinais, a análise de espaço de estados da série cujo objetivo é automatizar a seleção de variáveis importantes para o modelo de previsão, o procedimento propriamente dito para a previsão sem entrar em detalhes nos modelos de inteligência artificial utilizados para este propósito e finalmente, um exemplo de aplicação deste procedimento para a projeção das ENAs para o ano de 2018.

Inicialmente, foi feita uma análise estatística e espectral da série histórica de vazões mensais afluentes do reservatório de Furnas, onde foi mostrado que existe uma assimetria na sua distribuição de frequência e que há picos de energia nos ciclos anuais e mensais, mas que também possui a energia considerável ao longo de todo o espectro de frequência. Posteriormente, foi realizado um pré-processamento nos dados de Furnas através da aplicação da transformação logarítmica. Como esperado, a série transformada apresentou uma distribuição de frequências mais simétrica.

Dando continuidade, foi feito um pré-processamento na série de vazões/ENA, de forma que esta possa ser vista como sinal analítico, representada por uma sequência de números complexos, que preserve todas as informações da série original. Na representação fasorial a parte real é composta pelo sinal original (amplitude ou envelope) e a parte imaginária definida pela Transformada de Hilbert do sinal original (fase). Assim, a previsão passa a ser feita para as duas novas séries: Amplitude e Fase.

Foi apresentada em seguida a decomposição das séries de ENA (amplitude e fase) para os REEs Sudeste, Sul, Nordeste e Norte, para o período de 2012 a 2017, onde são mostrados os valores históricos e uma projeção feita para o ano de 2018. É possível observar nesta análise comportamentos esperados para cada REE com relação à média de longo termo, e em especial para o REE Sudeste, é indicado que a projeção feita pelo modelo consegue acertar o atraso do período úmido ocorrido em 2018.



Na segunda parte da apresentação foram introduzidos os métodos utilizados para encontrar o espaço de estados a ser considerado na parametrização do modelo preditivo. O método AMI (Informação Mútua Média) obtém informações não-lineares que caracterizam as dinâmicas da série temporal, o “delay” calculado pode ser entendido como uma medida de dependência temporal. O método FNN (Falsos Vizinhos Próximos) tem como objetivo calcular a “embedding dimension” que indica quando parar a adição de componentes ao espaço de estados.

Foram apresentadas as análises do AMI e FNN aplicados na série original, na série transformada (transformação logarítmica) e na série decomposta (amplitude e fase) para diversos REEs, e explicado como extrair a informação necessária para compor o espaço de estados a ser utilizado no modelo de previsão. Adicionalmente, foi mostrada a análise gráfica do espaço de dados obtido com o AMI e FNN para as diversas séries avaliadas. Foi observado que em geral a representação do espaço de estados para a série transformada obteve uma melhor organização em comparação com a série original.

Em seguida foi apresentado de forma esquemática o procedimento proposto para a projeção das séries de vazões/ENAs utilizando redes neurais artificiais (RNA) e espaço de estados. O primeiro passo do procedimento é aplicar uma transformação logarítmica na série original e depois são calculados o “delay” e a “embedding dimension” que fornecem automaticamente quais as variáveis que irão compor o espaço de estados, variáveis estas que serão utilizadas como entradas da RNA. A RNA é treinada com os dados do histórico completo e posteriormente aplicada para fazer a projeção do log da ENA. No último passo, valor previsto para o log da ENA será convertido em uma projeção de ENA.

A previsão vários passos a frente é realizada de forma encadeada, onde a previsão 2-passos-a-frente depende das variáveis do espaço de estado e da projeção feita 1-passo-a-frente, e assim, por diante. Este encadeamento é realizado até 14 passos à frente.

Para finalizar foi apresentada a projeção de ENA para 2018, realizada pelo procedimento apresentado, e a calculada pela média dos cenários gerados pelo modelo PARP utilizados no modelo NEWAVE.

### **Comentários Gerais**

O modelo apresentado pela CCEE utiliza técnicas que exploram os aspectos de não linearidade das séries de fluência, porém os modelos utilizados não fornecem aos usuários uma formulação matemática que possa ser empregada na formulação de solução atual do problema de planejamento da operação de médio e longo prazo.

Em relação ao modelo proposto, não é levado em conta a possibilidade de utilização deste procedimento para geração de cenários sintéticos de energia e vazão.

Outro aspecto que pode ser comentado é a necessidade de se aplicar a metodologia para outros anos que tenham um comportamento hidrológico distinto dos anos imediatamente anteriores, pois o modelo é fortemente influenciado pelo passado recente.

Por último, no trabalho apresentado não foi evidenciada uma conexão direta com alterações nos padrões climáticos.

### **2.8 A relevância da modelagem hidroenergética sobre aspectos regulatórios do setor elétrico brasileiro**

Apresentador: Bruno Machado

Instituição: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL

A apresentação discorreu sobre diversos temas relativos à atividade de regulação afetos à hidroeletricidade, tais como: tratamento da reserva de potência operativa na otimização do SIN; GSF; valoração do custo do deslocamento da geração hidrelétrica (GFOM); controle da geração hidrelétrica não despachada centralizadamente; bandeiras tarifárias; produtividade sazonal de hidrelétricas com baixa altura de queda no despacho ótimo e na formação do preço de curto prazo. Para o GSF e GFOM foi destacada a importância da variabilidade da série hidrológica considerada.

#### ***Comentários Gerais***

A apresentação trouxe resultados interessantes, mas não indicou proposta nova para a consideração dos efeitos de variabilidade/mudança climática nas séries de vazões afluentes às usinas hidroelétricas representadas no planejamento da expansão e operação energética.

### 2.9 Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos

Apresentador: Luís Fernando Badanhhan

Instituição: Ministério de Minas e Energia - MME

A apresentação discorreu sobre um projeto apoiado pelo MME/BIRD intitulado “Análise dos Reflexos das Mudanças Climáticas nas Metodologias de Planejamento de Sistemas Elétricos”, que foi desenvolvido entre 2017 e 2018.

A justificativa para a execução do projeto foi a constatação, através de observações científicas, do aumento nas temperaturas globais médias do ar e dos oceanos, derretimento generalizado de neve e gelo e aumento global do nível do mar, evidenciando que o aquecimento do sistema climático global é inequívoco e a temperatura global subiria quase 2C até o final do século, acima dos registros da era pré-industrial, conforme previsto pelo Intergovernmental Panel for Climate Change – IPCC (IPCC, 2014). Adicionalmente, foi colocado que dados do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) indicam que as diferentes regiões do Brasil já vêm experimentando alterações em seus climas característicos, em alguma medida.

A consultoria teria como objetivo geral avaliar a consistência das ferramentas e metodologias para análise de impacto das mudanças climáticas junto ao setor elétrico brasileiro.

Os resultados previstos pelo contrato e listados na apresentação se referem a:

- Estado da arte dos estudos de vulnerabilidade do setor elétrico;
- Modelagem climática para a geração elétrica, através da análise dados dos modelos de projeções climáticas, atualmente utilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- Avaliação das metodologias para projeções de vazões em uma bacia hidrográfica considerando a mudança no uso do solo e o uso consuntivo da água sob influência de cenários de mudança climática. Deverá ser utilizada como referência a Bacia do Rio São Francisco em um horizonte até 2050, submetido a um cenário de mudança climática;
- Análises da influência das alterações dos parâmetros climáticos sobre o planejamento de expansão de sistemas elétricos identificando como essas alterações refletem nas metodologias e modelos computacionais.

### *Comentários Gerais*

Foi apresentado um projeto em início de desenvolvimento. No presente momento, os resultados da consultoria foram publicados em dezembro de 2018. Com referência à inclusão do efeito das mudanças climáticas, a consultoria identificou cinco grandes grupos de estudos de planejamento, em que a atual forma de proceder deve ser mudada para incluir tais efeitos:

- Planejamento da oferta de energia;
- Previsão da demanda;
- Planejamento da transmissão;
- Planejamento do sistema elétrico;
- Estudos de vulnerabilidade de ativos físicos/sistemas e planos de resiliência.

Em relação ao tema específico do Workshop, “Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e Avaliação da Melhor Representação Energética de Séries de Vazões Naturais”, a consultoria pontuou em seu relatório final que as séries de aflúncias futuras utilizadas nos modelos de otimização/simulação adotam a premissa de que o processo de vazões afluentes às usinas hidroelétricas é estacionário e que esta premissa deve ser avaliada frente aos efeitos verificados das mudanças climáticas. Porém não apresentaram propostas específicas.

### 2.10 Modelagem Estocástica de Vazões Naturais – Representação de Variáveis de Tempo e Clima

Apresentadores: Maria Elvira P. Maceira e Jorge Machado Damázio

Instituição: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

Inicialmente, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica descreveu de forma sucinta os modelos de sua Cadeia de Modelos que podem sofrer a influência de variabilidade climática, mudança do clima e de tendências macroclimáticas, a saber: modelo DIANA para o Controle de Cheias, sistema PREVIVAZ para a previsão de vazões diária, semanal e mensal e também o modelo GEVAZP para a geração de cenários de vazões mensais de curto, médio e longo prazo.

A seguir foi colocada a preocupação, a nível mundial, com o aquecimento global - ou mudanças climáticas, e com os impactos do aumento dos níveis de emissões de gases de efeito estufa de origem antropogênica nos sistemas climáticos, culminando com o estabelecimento, em, 2015, do Acordo de Paris. Por esta razão, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC tem realizado análises periódicas sobre os impactos e riscos relacionados à mudança do clima, e como os impactos podem ser reduzidos e gerenciados por meio de ações de mitigação e adaptação. Eventos climáticos extremos e mudanças nos padrões hidrológicos podem ser esperados devido às alterações provocadas pela mudança do clima, com impactos no comportamento futuro das vazões afluentes às usinas hidroelétricas. Neste sentido, o CEPEL iniciou um projeto de pesquisa – MudClima, cujo objetivo é estreitar o hiato entre os modelos climatológicos e de simulação/otimização energética do CEPEL.

Uma das vertentes do projeto MudClima refere-se à identificação e avaliação da influência de fenômenos climáticos para a geração de cenários e previsão de vazões, especificamente na apresentação, sobre o fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENOS) que é um fenômeno climático natural importante, tendo diversos impactos nos padrões de circulação global da atmosfera e de variações climáticas (incluindo a precipitação) por todo o mundo.

Entre seus impactos mais proeminentes, encontram-se as alterações nos padrões de precipitação e vazões fluviais. No Brasil, diversas pesquisas apontam para uma influência marcante nas precipitações, e, conseqüentemente, nas vazões afluentes aos reservatórios das UHEs. De maneira geral, eventos de El Niño estão relacionados a um aumento nas anomalias de precipitação e vazão na Região Sul do Brasil e partes das Regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, enquanto que a Região Norte tende a sofrer mais secas. A fase La Niña provoca efeitos de forma inversa ao El Niño.

Na apresentação foi destacado que, em relação à consideração de variáveis climáticas na geração de cenários de vazões, o modelo de geração de cenários diários desenvolvido pelo CEPEL, utilizado nos estudos de controle de cheias, incorpora desde o final da década de 90 informações sobre o fenômeno ENOS. Esta incorporação permite que os espaços vazios alocados nos reservatórios das UHEs para o controle de cheias sejam otimizados.

No âmbito do Projeto MudClima do CEPEL, foi divulgado que encontrava-se em desenvolvimento uma metodologia para a consideração dos efeitos do fenômeno climático ENOS para ser considerada na geração de cenários sintéticos de afluições do modelo GEVAZP, cenários estes que são empregados nos modelos NEWAVE e DECOMP, resultando em uma precisão maior as distribuições multivariadas de probabilidades condicionadas para as afluições futuras. A partir da identificação dos diferentes estados de ENOS no histórico, foi implementada uma estimativa segmentada dos parâmetros média e desvio-padrão mensais das afluições que passam a variar de acordo com as fases do fenômeno. Para a evolução temporal das fases do modelo, calibra-se uma cadeia de Markov.

Uma outra vertente do projeto MudClima em desenvolvimento à época dizia respeito a elaboração de uma metodologia para, a partir dos Representative Concentration Pathways (RCP) do IPCC, produzir cenários de vazões afluentes às usinas hidroelétricas até 2100, incluindo eventos extremos. A metodologia para a elaboração de cenários futuros (e.g., para o período 2011-2100) de afluições mensais às UHEs do SIN se iniciou com as previsões de chuva e temperatura calculadas pelo modelo regional ETA, integradas na escala mensal. Em seguida, o modelo ETA, executado em modo climático, estava sendo aninhado aos modelos climáticos globais HadGEM2-ES e MIROC5, e segundo dois dos cenários RCPs do IPCC - RCP 4.5 e 8.5, dando origem a quatro conjuntos básicos de cenários futuros de chuva e temperatura, dentre outras variáveis. A partir dessas previsões, estava prevista a utilização de um modelo hidrológico determinístico do tipo chuva-vazão - SMAP, para a determinação das séries de afluições mensais às usinas hidroelétricas. Foi pontuado que esta metodologia estava sendo aplicada para quinze usinas hidroelétricas do sistema interligado brasileiro.

Foram ainda apresentados alguns resultados do estudo, que o CEPEL vem desenvolvendo, para a identificação de possíveis alterações no comportamento de séries de vazões máximas e mínimas anuais e vazões anuais. Os resultados preliminares apresentados mostraram a importância de se considerar metodologias adequadas para análise do comportamento de cada tipo de série, por exemplo, séries que apresentam correlação temporal e séries de valores extremos:

- Vazões anuais afluentes às UHEs Furnas, Sobradinho e Três Marias. Apenas para a série de Sobradinho a hipótese de estacionariedade foi recusada ao nível de 5%, quando se considera a correlação temporal nos testes;

- Vazões máximas anuais afluentes: em algumas UHEs a hipótese de estacionariedade foi rejeitada quando se considera a distribuição generalizada de extremos;
- Vazões mínimas anuais, duração= 1, 10 e 30 dias afluente às UHEs Furnas, Sobradinho, Três Marias, Jupia, Água Vermelha e Barra Bonita. As séries de Sobradinho, Três Marias e Furnas tiveram a hipótese de estacionariedade recusada para alguma duração quando se considera a distribuição generalizada de extremos.

### ***Comentários Gerais***

O modelo GEVAZP com a representação do fenômeno ENOS já se encontra hoje disponível, podendo ser utilizado de imediato para a geração de cenários para o modelo DECOMP em sua utilização no Programa Mensal de Operação Energética (PMO), elaborado pelo ONS com a participação dos agentes. Portanto, foi realizado um aprimoramento da representação de uma não estacionariedade embutida em um fenômeno climático global cíclico na geração de cenários de aflúências.

Em relação à construção de cenários de vazões afluentes às usinas hidroelétricas até 2100 considerando os cenários de mudança climática, e sua utilização para avaliação dos impactos na capacidade de regularização das usinas hidroelétricas está sendo atualmente estendida para as demais usinas do SIN a fim de possibilitar medidas de adaptação/mitigação nos estudos de planejamento da expansão e operação do SIN.

Os estudos iniciais para a identificação de possíveis alterações no comportamento de séries de vazões máximas e mínimas anuais e vazões anuais estão sendo detalhados e aprofundados.



### 2.11 Alterações de Padrões Climáticos e hidrológicos e avaliação da melhor representação energética de séries de vazões naturais

Apresentador: Carlos Henrique Ribeiro Lima

Instituição: Universidade de Brasília (UnB)/Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

A apresentação iniciou com uma contextualização onde foram elencadas as metodologias atualmente adotadas para geração de cenários de energias e vazões, e para previsão de vazões. Foi também apresentada a definição clássica de estacionariedade em processos estocásticos e discutidas as seguintes questões:

- Stationarity is dead: whither water management? P.C.D. Mily, et al, Climate Change
- Modeling and mitigating natural hazards: stationarity is immortal. A. Montanari e D Koutsoyiannis, Water Resources Research, 10.1002/2014, AGU Publications
- Stationarity: Wanted dead or alive? H.F. Lins e T. A. Cohn, Journal of the American Water Resources Association, June 2011

Concluindo que: “Embora seja importante reconhecer que a não-estacionariedade existe como uma característica do mundo natural, também é importante reconhecermos que todas as variações que foram registradas nos registros históricos e observadas nos processos hidroclimáticos podem ser representadas com modelos estocásticos que possuam uma parcela estacionária e outra de tendência. Em conclusão: estacionário  $\neq$  estático e não-estacionária  $\neq$  mudança (ou tendência).”

A segunda parte da apresentação discorreu sobre os diferentes tipos de “mudanças” nas séries de vazões (tendência monotônica, mudança abrupta, tendência polinomial, cíclica ou periódica) salientando que a modelagem dependerá não só do tipo de “mudança”, como também da escala temporal. Além disto, as causas das mudanças podem ser conhecidas ou não.

Na terceira parte foi apresentado, graficamente, o comportamento de séries de anomalias hidroenergéticas anuais para os subsistemas SE, S, NE e N, considerando a média móvel de 5 anos e 30 anos e, a variância móvel de 30 anos. No primeiro caso a análise gráfica indicou tendência crescente no subsistema S, decrescente o NE. A análise gráfica considerando a média móvel de 30 anos seguiu esse comportamento. Foi também apresentada uma análise de tendência cíclica das séries de anomalias de energias afluentes dos subsistemas SE e NE e da possível inter-relação entre os dois subsistemas. Estas análises exemplificaram a dificuldade para a identificação do tipo de tendência, fundamental para a escolha da metodologia mais adequada e chamou atenção para o uso de variáveis exógenas

(ex: SST, Dipolo, chuva etc.) para incorporação de tendência na modelagem (ex: PARX, RIDGE regression) para previsão de afluências em diferentes escalas de tempo. Foi apresentado um esquema para verificação de alteração em séries de vazões/energia, no qual primeiramente busca se identificar se a série apresenta alteração e se essa alteração é de tendência ou mudança de nível. Caso seja identificada alteração, sugere verificar a influência de variáveis exógenas e o uso de modelos de regressão condicionado a variáveis exógenas. Ainda sobre variáveis exógenas, chamou atenção para as dificuldades na previsão de chuvas com antecedência maior que uma semana. Também chamou atenção para a importância de se considerar a variabilidade espacial na geração de cenários.

O modelo Hidden Markov não homogêneo foi apresentado como opção para considerar parâmetros não-estacionários e o modelo Bayesiano ponderado para a combinação de modelos em diferentes escalas de tempo obtidas pelo modelo PARX considerando variáveis climáticas e da abordagem bayesiana hierárquica como forma de incorporar a incertezas na estimativa dos parâmetros.

### **Comentários Gerais**

A apresentação abordou vários temas relevantes relacionados à análise do comportamento passado e modelagem das séries de vazões e energias, destacando-se:

- Importância de investigar o comportamento não estacionário das séries de vazões e energia;
- Consideração de variáveis exógenas na geração de cenários de vazões e energias, apresentando como sugestão o modelo Hidden Markov não homogêneo como opção para considerar parâmetros não-estacionários. Seguem alguns comentários:
  - Versão recente do modelo GEVAZP, responsável pela geração de cenários de vazões mensais, emprega uma Cadeia de Markov para representar o impacto de fenômenos macroclimáticos em parâmetros não estacionários. Adicionalmente, os cenários de vazões diárias, gerados pelo modelo DIANA para o controle de cheias, já consideram o ENOS como variável exógena desde o final da década de 90;
  - No sistema PREVIVAZ do CEPEL, o modelo PREVIVAZH permite considerar a previsão de precipitação para a previsão de vazões diárias. Na geração de séries sintéticas de vazões mensais foi feita uma experiência com a utilização da chuva observada. No entanto, como explicitado na apresentação, existem dificuldades na previsão de chuvas com antecedência maior que uma semana;

- Existem estudos em curso (ONS, CEPEL, etc.) que buscam identificar outras variáveis exógenas que possam explicar o comportamento das vazões nas bacias hidrográficas brasileiras, para posterior incorporação nos modelos hidrológicos.
- Abordagem bayesiana hierárquica como forma de incorporar a incertezas na estimativa dos parâmetros;
  - Este é um tópico que pode ser pertinente na modelagem de séries temporais, mas não é explorado pelo setor elétrico devido à grande extensão do registro histórico de vazões.
- Modelo Bayesiano ponderado para a combinação de modelos.
  - Este é um tópico que pode ser pertinente para modelos de previsão de curto prazo (horizontes de 1 dia a algumas semanas) de séries temporais. No estágio atual das aplicações de interesse do Setor Elétrico, consideramos que um esforço maior deve se concentrar em avaliar metodologias de incorporação de informações climáticas nos modelos de previsão.
- Importância de se considerar a variabilidade espacial na geração de cenários de vazões e energias.
  - Os modelos atualmente adotados no SEB para geração de cenários de vazões e energias mensais e de vazões diárias já consideram a dependência espacial.

### 2.12 Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e Avaliação da Melhor Representação Energética de Séries de Vazões Naturais

Apresentador: Rafael Kelman

Instituição: Power System Research - PSR

A apresentação da PSR discorreu sobre alguns aspectos das alterações dos padrões climáticos e hidrológicos, descritos a seguir.

Inicialmente, em relação ao tema Hidrologia, foi comentada a tendência de redução dos últimos anos nas vazões naturais afluentes à usina hidroelétrica de Sobradinho e elencadas as possíveis causas como sendo:

- A consideração de uma retirada de água menor do que a real na reconstituição da série de vazões naturais devido, por exemplo, o crescimento da retirada de água para irrigação dos consumidores da Coelba entre os anos de 2006 e 2016;
- A alteração no uso do solo, implicando em necessidade de se atualizar os parâmetros das modelagens;

A PSR lista como possíveis ações para a modelagem das vazões da bacia do Rio São Francisco (i) utilizar somente os dados mais recentes; ou (ii) ajustar o histórico de vazões através do aumento da retirada de água nos anos mais recentes a fim de se obter um histórico de vazões estacionário. Essas duas sugestões foram apresentadas no Grupo de Estudo de Planejamento de Sistemas Elétricos do XXIV SNPTEE - 2017 (“Uma análise climática e energética sobre as reduções das vazões do rio São Francisco e seu impacto no SIN”). Na apresentação do workshop foi sugerida ainda (iii) ajustar uma tendência à série histórica de vazões. O apresentador ressaltou que é preferível não descartar nenhuma informação do histórico de vazões e sim, ajustar o processo de geração de vazões no planejamento da operação energética.

Em relação ao tema Mudança Climática, foi apresentada uma experiência com as projeções de temperatura e precipitação de diferentes modelos de circulação geral da atmosfera após downscaling, alimentando um modelo chuva-vazão (SMAP) calibrado para algumas usinas nas bacias hidrográficas. O conjunto de vazões resultante permitiu o ajuste dos parâmetros de um modelo estocástico para uso em simulações probabilísticas, porém não foi detalhado o ajuste realizado. A aplicação do estudo às bacias das quatro regiões do Brasil indicou redução nas energias afluentes à região Sudeste, Nordeste e Norte e acréscimo às energias afluentes da região Sul. Esse comportamento implica, então, em um aumento de emissões de CO<sub>2</sub> e aumento da geração térmica.

Em relação ao tema Água>Energia, foi indicada a necessidade de atualização dos polinômios Vazão x Nível do Canal de Fuga e Cota x Volume, utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Ainda no tema Água>Energia, foi pontuado o desafio de integrar a gestão de recursos hídricos ao planejamento do setor elétrico. Como exemplo, o apresentador citou a retirada de água do rio São Francisco que depende tanto da disponibilidade de água do rio como do nível de armazenamento dos açudes do Ceará, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. A integração possibilitaria a alocação “inteligente” de água através da comparação de seu custo de oportunidade entre usuários (ex. hidroeletricidade x diversos cultivos de maior ou menor valor agregado). Essa integração permitiria, através dos cenários citados no tema Mudança Climática, uma maior coerência entre a vazão afluente projetada e a vazão retirada para irrigação. Esta última deixaria de ser uma meta mensal única e passaria a estar associada a cada cenário de vazão afluente projetada.

Também fez parte da apresentação a citação de alguns aperfeiçoamentos, tais como: o efeito do deplecionamento e da variação do nível do canal de fuga nos modelos de planejamento energético de longo prazo; representação de regras operativas em reservatórios a fio d’água e perda de potência em usinas hidroelétricas de baixa queda. Em relação a uma representação mais detalhada, comum nos estudos de despacho de operação horário, foram citadas a representação das curvas colina, perdas hidráulicas, unit commitment, zonas proibidas, tempo de viagem para usinas em cascata, rampas máximas, máximo número de partidas, diferentes reservas operativas e as restrições de transmissão.

### **Comentários Gerais**

A apresentação abordou vários temas relevantes, destacando-se:

- Utilizar apenas os dados de vazão mais recentes; no entanto, o apresentador ressaltou que é preferível não descartar nenhuma informação do histórico de vazões e sim, ajustar o processo de geração de vazões no planejamento da operação energética;
- Ajuste do histórico de vazões através do aumento da retirada de água nos anos mais recentes a fim de se obter um histórico de vazões estacionário.
  - É preferível executar um estudo detalhado para estimação da real retirada de água para irrigação nos moldes do estudo feito pela ANA.
- Ajuste de uma tendência à série histórica de vazões.
  - Após o estudo detalhado no item anterior, o ajuste de uma tendência pode ser avaliado, mas de forma cuidadosa, pois o desafio é projetar até que momento do futuro ela se mantém.

Com respeito aos temas adicionais apresentados, ressalta-se que o modelo de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos interligados de longo/médio prazo, utilizado oficialmente pelo setor elétrico, passou a representar algumas das funcionalidades comentadas a partir de Agosto de 2018.

### 2.13 Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e Avaliação da Melhor Representação Energética de Séries De Vazões Naturais - Experiência da Academia

Apresentador: André F. P. Lucena

Instituição: Programa de Planejamento Energético – COPPE/UFRJ

A apresentação iniciou com a reprodução de uma tabela de impactos de diversas variáveis climáticas nos sistemas energéticos, disponível na publicação do Banco Mundial “Climate Impacts on Energy Systems – Key Issues for Energy Sector Adaptation” de autoria de J. Ebinger e W. Vergara. Segundo o apresentador, existem metodologias para a avaliação de impactos de mudanças climáticas, citando como exemplo o manual técnico para formulação de estudos sobre impactos e adaptação do IPCC, onde são tratados os experimentos, as analogias empíricas, o julgamento de especialistas e a projeção de impactos de mudanças climáticas.

Ainda segundo o apresentador, duas abordagens são empregadas na projeção de impactos de mudanças climáticas: a abordagem sequencial e a abordagem paralela. Em ambas, para cada cenário de emissões GEE (RCPs) do IPCC, é realizada a modelagem climática global, a partir da qual são obtidas as projeções de precipitação, temperatura e demais variáveis a nível global. Esses resultados alimentam os modelos climáticos regionais, obtendo-se, então, as projeções de precipitação, temperatura etc que alimentarão os modelos hidrológicos obtendo-se projeções de vazão afluente aos reservatórios do sistema interligado nacional. Na abordagem paralela os cenários de emissão (RCPs) também são considerados diretamente na modelagem energética. Assim, para cada um dos cenários de emissões, obtém-se uma avaliação de impactos e alternativas de adaptação do sistema energético. Foram apresentados os 23/42 modelos climáticos globais listados no Quarto e Quinto Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR4 e AR5), respectivamente, e também o aumento de temperatura de superfície e a variação percentual de precipitação para alguns desses modelos. Enfatizou-se a importância do acoplamento e troca de informações entre os modelos hidrológico e energético.

Foram apresentados alguns dos resultados do documento “Brasil 2040 – Resumo Executivo”, publicado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República em 2015. Por exemplo, foi mostrada a redução na série de vazões projetadas até 2100 afluentes às usinas hidroelétricas Tucuruí e Sobradinho segundo os RCPs 4.5 e 8.5. Com as séries de vazão projetadas, foi calibrado um modelo de geração de séries sintéticas com base nos valores de média e desvio-padrão dos cenários projetados. Essas séries sintéticas, então, foram utilizadas em modelos de planejamento da expansão e da operação energética. Ainda deste documento, foram apresentados os custos operativos e de déficit no período 2015-2030 e a evolução da geração média por fonte no período 2010-2040 para os diversos cenários considerados.

### *Comentários Gerais*

A apresentação abordou vários temas relevantes, mostrando que o impacto das mudanças climáticas foi introduzido no estudo de longo prazo (Brasil 2040) por meio dos valores de média e desvio-padrão das séries projetadas. No entanto, é importante ressaltar que projeções futuras devem ser cautelosamente levadas em consideração, uma vez que as incertezas associadas às interações entre a dinâmica atmosférica e o ciclo hidrológico estão presentes.

### 3. Conclusões

No Workshop “Alterações de Padrões Climáticos e Hidrológicos e Avaliação da Melhor Representação Energética de Séries de Vazões Naturais”, proposto e organizado pelas instituições participantes do GT-Metodologia da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico (CPAMP/MME), foram apresentados 14 trabalhos de representantes de Universidades, Centros de Pesquisa, Consultoria e Órgãos do Governo. Essas apresentações se concentraram nos grandes temas de Hidrologia e Clima e Modelagem Energética.

Dentre os principais pontos levantados nessas apresentações, podem-se elencar as seguintes contribuições:

- Necessidade de prosseguir nos estudos de investigação da **estacionariedade** das séries de vazões afluentes aos reservatórios de usinas hidroelétricas. De acordo com o exposto em algumas apresentações, a não estacionariedade pode estar relacionada aos usos consuntivos, às mudanças no uso do solo e/ou à presença de tendência causada pela variabilidade ou mudança do clima. Algumas propostas dizem respeito ao descarte da parte mais antiga do registro histórico. Outras defendem a modificação nos valores de uso consuntivo de modo a garantir a estacionariedade da série de vazões e, ainda, ajustar uma tendência aos dados.
  - A identificação do ponto de corte do histórico é um desafio a ser investigado. Esta abordagem precisa levar em consideração a perda de informação com o descarte de parte da série histórica;
  - Com respeito à adequação com o ajuste dos valores de uso consuntivo, é preferível executar um estudo detalhado para estimação da real retirada de água para irrigação nos moldes do estudo feito pela ANA;
  - O ajuste de uma tendência deve ser avaliado, mas de forma cuidadosa, pois o desafio é projetar até que momento do futuro ela se mantém.
- Inclusão de **variáveis climáticas** nos modelos de previsão e geração de cenários de vazões.
  - Algumas iniciativas foram apresentadas como, por exemplo, a versão do modelo de geração de cenários mensais GEVAZP que representa o impacto do fenômeno macroclimático ENOS no cálculo de seus parâmetros não estacionários. Adicionalmente, os cenários de vazões diárias gerados pelo modelo DIANA, utilizado para o controle de cheias, já consideram o ENOS como variável exógena desde o final da década de 90. Assim, a representação de um fenômeno climático global cíclico na geração de cenários de afluências já embute uma não estacionariedade;
  - Ressalta-se a importância de investigar a possibilidade de considerar outros fenômenos macroclimáticos e de como representá-los nos modelos hidrológicos. Adicionalmente, entre outros modelos, o PREVIVAZH permite considerar a previsão de precipitação para a previsão de vazões



diárias. No entanto, como explicitado em algumas apresentações, existem dificuldades na previsão de chuvas com antecedência maior que uma semana.

- A construção de cenários de vazões afluentes às usinas hidroelétricas até 2100 considerando os cenários de mudança climática do IPCC deve ser utilizada para possibilitar a avaliação de medidas de adaptação/mitigação nos estudos de planejamento da expansão e operação do SIN. Propostas que recomendam o uso dessas projeções para a definição dos parâmetros de modelos hidrológicos devem ser vistas com cautela, uma vez que grandes incertezas associadas às interações entre a dinâmica atmosférica e o ciclo hidrológico estão presentes.

O estudo sobre a variabilidade e as mudanças climáticas envolve grande incerteza e, portanto, é fundamental envidar esforços para sua compreensão e representação nos modelos utilizados no planejamento da expansão e da operação do Sistema Interligado Nacional. Por fim, é importante destacar que eventos desta natureza, reunindo representantes de empresas do Setor Elétrico, Universidades, Centros de Pesquisa e Órgãos Governamentais, trazem valiosas contribuições para o debate acerca de temas de grande relevância para o desenvolvimento do Setor Elétrico Brasileiro.