



GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL

FERRAMENTAS DE MINERAÇÃO DE DADOS APLICADAS AO PLANEJAMENTO INTEGRADO PARA A PREVISÃO DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

EVERTHON TAGHORI SICA(1);SÉRGIO AVILA(1);KATHIUSSIA SEVERGNINI(2);MURILO PEREIRA SOARES(2);ÉRIC LOURENÇO AMÉRICO;LUCAS YUKI IMAMURA;KAREM VIEIRA PAES DE LIMA;BRUNA AMÉRICO TRENTO IFSC(1);FLOW ENERGIA(2)

RESUMO

A negociação, compra e venda, de energia elétrica é realizada em uma estrutura de mercado em que os produtos transacionados possuem uma correlação com o estoque de capital natural hídrico e com o comportamento dos agentes econômicos ativos. Desse modo, uma metodologia de planejamento para auxiliar na previsão de tendências e frustrações nesse ambiente de mercado pode ter melhor assertividade ao integrar fenômenos energéticos, econômicos e meteorológicos. Assim, a mineração de dados e a inteligência computacional podem contribuir como ferramentas para o planejamento integrado de recursos demonstrando a conexão dos fenômenos envolvidos, organizando incertezas para o auxílio à decisão em ambiente de mercado.

PALAVRAS-CHAVE Inteligência Computacional, Mercado de Curto Prazo, Planejamento Integrado, Precipitação.

1.0 INTRODUÇÃO

A oferta e demanda econômicas e o consumo e uso final de energia são fenômenos sociais. Entretanto, a produção de energia elétrica possui função de produção dependente do capital tecnológico, do trabalho, mas, sobretudo, do comportamento do capital natural, ou seja de um fenômeno ambiental. Assim, uma metodologia de planejamento para auxiliar à decisão em ambiente de mercado pode ser integrada ao considerar variáveis energéticas, meteorológicas, hidrológicas e econômicas. Ferramentas deste planejamento integrado podem, portanto, avaliar o comportamento dos agentes econômicos, incorporando cenários, por meio do volume negociado.

Para qualquer abordagem que se opte, a complexidade do modelo é proporcional a quantidade de fenômenos nele representados. Fato, também, é a facilidade crescente ao acesso de dados e informações do clima, da meteorologia, da hidrologia, de geração e comercialização, entre outras. O uso de todas essas informações proporcionam um modelo estratificado, mais realista e, por consequência, mais complexo. Usualmente, diante dessas características, um modelo de planejamento integrado é abordado de maneira *bottom-up*. As abordagens do tipo *top-down* ou *bottom-up* se referem às estratégias de tratamento das informações: agregada ou desagregada. A abordagem *bottom-up* envolve a descrição detalhada dos elementos que compõem os submodelos de um sistema. Estes submodelos são organizados em diversos níveis até a definição completa do sistema (1).

Nesse sentido, um dos objetos de estudo deste artigo é apresentar e demonstrar o uso de técnicas de modelagem de inteligência computacional para mineração de dados, buscando entender as correlações entre os fenômenos analisados. A intenção é reduzir a dimensionalidade do problema econômico de planejamento integrado de recursos como ferramenta de auxílio à decisão de mercado, considerando commodities de forte interdependência com a variabilidade do capital natural. E, desta forma, considerar no modelo apenas as variáveis mais relevantes e pertinentes, sem afetar o realismo do problema em estudo. Portanto, este artigo usa os coeficientes de correlação para avaliar múltiplos dados de diferentes naturezas frente ao comportamento do mercado de energia elétrica. Entender as correlações ajuda na tomada de decisão quanto a considerar ou não uma variável no modelo de planejamento integrado de recursos.

2.0 - ABORDAGEM DE MERCADO ATRAVÉS DO PLANEJAMENTO INTEGRADO DE RECURSOS

A análise da mutualidade entre os recursos hídricos, sob condicionantes meteorológicos, e as idiosincrasias do mercado de curto prazo de energia elétrica formam um problema que envolve os recursos naturais hídricos e os fenômenos climáticos conjugado aos reflexos e efeitos causais no mercado de energia elétrica, como dependente. Portanto, é recomendável considerar a variabilidade tempo-espço, as interferências antrópicas e o

comportamento precipitação-vazão do capital natural hídrico. Trata-se, então, de um problema multidisciplinar e, sobretudo, interdisciplinar (2).

O planejamento do setor de energia elétrica tem como um de seus instrumentos as séries hidrológicas históricas. Essas séries podem ser estendidas com base na precipitação-vazão e contribuem para o equacionamento da disponibilidade de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional de energia elétrica (SIN). A base de dados de entrada, de precipitação e de evapotranspiração, para extrapolar essas séries históricas necessita ser suficientemente longa. A série de vazões e do recurso armazenável resultantes serão compostas de um período de valores observados e a partir da precipitação e do comportamento de cada sub-bacia (2, 3).

Diante disso, pode-se concluir que o serviço ambiental meteorológico contribui com a taxa de recomposição do estoque do capital natural hídrico junto a bacia hidrográfica para produção de eletricidade. Entretanto, apenas a eletricidade enquanto mercadoria tem valor e preço subjugados a estrutura de mercado. Por sua vez, tanto a precipitação quanto a vazão, como “fatores de produção” para Energia Natural Afluente (ENA), são consideradas externalidades econômicas ambientais, pois não são objeto de troca em mercado econômico. O conceito de capital natural foi introduzido por Solow (4) e pode ser definido como “o conjunto dos recursos naturais e dos serviços ambientais [...] que são assimilados na forma de capital como argumento de uma função utilidade ou como fator de produção. [...] Os princípios da teoria do capital podem ser aplicados ao capital natural” (5). Deste modo, os processos intervenientes ao planejamento integrado podem ser interpretadas como uma mutualidade intrínseca, da seguinte forma:

- dimensão econômica – o comportamento do preço do produto energia elétrica no ambiente de negociação;
- dimensão ambiental – o recurso hídrico interpretado pelos fenômenos meteorológicos e climáticos; e
- dimensão social – o comportamento dos agentes econômicos interpretados de forma endógena pelo volume de energia elétrica negociado e de forma exógena pelas agressões ao preço por agentes de mercado.

Porém, a expectativa de precipitação ou de ENA não são os únicos fatores relacionados à frustração ou à Perspectiva de Comportamento Econômico (6) dos agentes de mercado. Assim, a expectativa da disponibilidade pluviométrica deve se apoiar na interação entre os processos econômico, social e ambiental, para proporcionar cenários coerentes com a composição orgânica do capital econômico e natural.

O planejamento integrado de recursos proposto é caracterizado do ponto de vista estratégico como *bottom-up* para este objeto, tendo como principais aspectos, Figura 1-(a), o estudo do comportamento do preço e do volume negociado por produto de energia elétrica e do comportamento do recurso natural, por meio de submodelos.

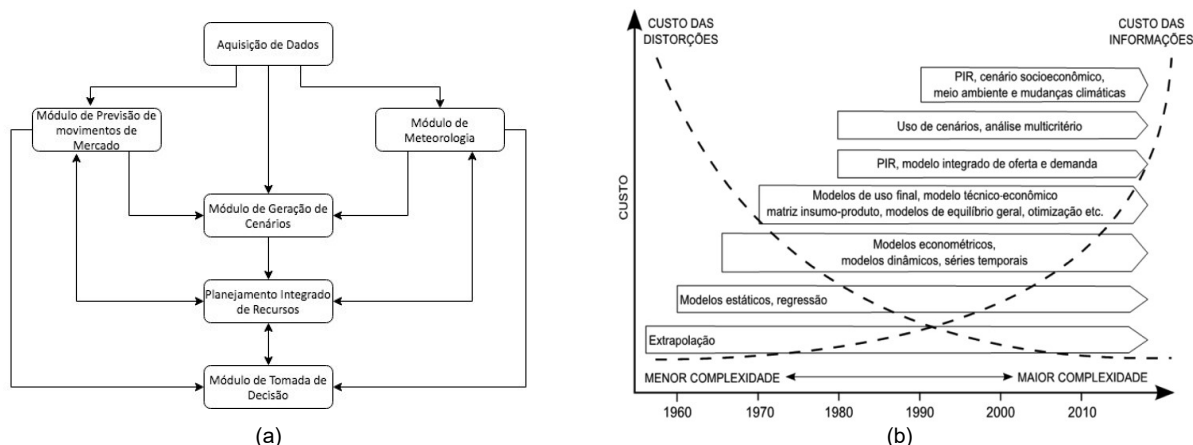


Figura 1 – (a) Esboço da estratégia preliminar e (b) Evolução de modelagem e equacionamento (1)

O esboço preliminar da estratégia apresenta módulos responsáveis pelo equacionamento e modelagem das variáveis de características meteorológicas e econômicas com a finalidade de elaborar cenários hipotéticos equiprováveis que serão incorporados sob metodologia de planejamento integrado de recursos para o auxílio à decisão. A metodologia abarcará as variáveis intervenientes por meio de uma plataforma de inteligência computacional. Esta plataforma poderá reunir diversas técnicas, cada uma relacionada ao comportamento do fenômeno e evento modelado. A evolução dos métodos computacionais proporcionaram o emprego de técnicas que eram apenas analíticas, Figura 1-(b), como fora desenvolvido em (7).

3.0 - COMPORTAMENTO DE PREÇOS NO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A compreensão inicial sobre fundamentos de um amplo campo de *commodities* pode ser utilizada no entendimento do comportamento do preço da eletricidade. Entretanto, há resguardos, mais precisamente quando um agente comercializador tentando obter uma vantagem sobre o preço de negociação ou, por exemplo, uma tendência sobre o mesmo.

A identificação dos movimentos de volume negociado, de agressões para fechar a transação e de precipitação prevista se mostram intrínsecos à direção de comportamento do preço. No obstante, aplicações de processos estatísticos e ajustes adicionais sobre estes se tornam uma vertente importante para avaliar e entender comportamento do preço, tanto sobre o mercado de *comodities*, como é observado há anos, mas também em mercados de energia elétrica considerando incrementos e ajustes para tal.

A estrutura do mercado de energia elétrica não pode ser dissociada do recurso natural, em que pese a interpretação da eletricidade como *commodity* ela não é estocável em si - o entendimento de estoque é relativo apenas ao capital natural. Desse modo, a energia elétrica pode ser compreendida como *commodity* não-estocável e negociada sob estrutura de mercado futuro ou à vista. No ambiente de mercado futuro, os produtos são negociados antecipadamente, por meio de contratos, como volumes de energia elétrica para serem entregues em meses específicos, por exemplo: produto janeiro, produto fevereiro, etc. Um contrato de preço futuro (*forward price*) é um acordo de balcão entre duas partes para um troca em algum momento futuro, sendo que o valor é fixado no momento do contrato.

O mercado futuro não é o único ambiente de negociação dos produtos, há, também, o mercado *spot*, conhecido como mercado à vista, em que a liquidação dos contratos negociados são realizados com um atraso muito curto, exemplo: dias. Nesse sentido, o comercializador (*trader*) ao optar pelo mercado à vista precisa desembolsar uma certa quantia financeira para adquirir o produto, ou recebendo imediatamente ao realizar sua venda. Já, ao optar pelo mercado futuro, o *trader* fará a compra ou venda do produto de acordo com os valores pré-datados para dia estipulado ao encerramento do contrato - momento da entrega e da liquidação do produto. Contudo, existem diferenças entre esses ambientes de mercado, tais como (8):

- o risco da contrapartida - no ambiente de mercado futuro há uma administração de risco, pois os negócios ocorrem no futuro, sendo essa administração no âmbito de que comprador tenha a garantia de que o vendedor estará com o produto a disposição para entrega, ao final do contrato; ou a garantia de que o vendedor terá o montante financeiro negociado; e
- o tempo da liquidação - no mercado *spot*, ou à vista, possui transações muito curtas, enquanto que no mercado futuro, as operações ocorrem no futuro.

O *trader*, então, pode usualmente agir sobre os seguintes preceitos:

- a operação de *hedge* - o objetivo de quem opera o mercado futuro como *hedger* é de proteção, exemplo: um investidor que tenha adquirido o produto no mercado à vista e quer se proteger de possível queda nos preços com a venda de um contrato futuro;
- a operação de especulação - o objetivo de quem opera em especulação, em oposição ao *hedger* que busca proteção, é obter retorno com a variação dos preços, ao mesmo tempo em que acaba gerando liquidez no mercado; e
- a operação de arbitragem - o objetivo de quem opera deste modo é obter vantagem com eventuais distorções nos preços entre o mercado à vista e futuro, ou entre diferentes submercados.

3.1 - Curva de preço a termo e futuro

A energia elétrica não é armazenável em grandes proporções, esta característica é estritamente correlacionada de certa forma com a volatilidade nos preços de energia elétrica. A volatilidade mede a aleatoriedade e em mercados de eletricidade não é constante. A evolução dos preços da eletricidade apresenta acentuada reversão à média e padrões cíclicos, assim como picos de ocorrência relativamente frequente, e manifesta presença de propriedade de memória. A mudança do preço, em um pequeno intervalo de tempo, é composta de uma mudança determinística que é fixa ou determinável a partir do estado atual mais uma mudança que é aleatória e definida como estocástica. Deste modo, uma forma compreender estas mudanças no preço pode ser por meio dos conceitos de *random walk*, de difusão de salto, de reversão à média e de periodicidade (8):

- *Random walk* - o termo *random walk* ou “passeio aleatório” é o processo mais simples: em cada intervalo de tempo de comprimento fixo, a variável irá aumentar um passo para cima ou para baixo, ou seja, cada *step* no processo tem um probabilidade de chance de um movimento (8), como, $\Delta S = \pm \sigma \Delta t$, em que σ é o tamanho do passo e Δt é um passo infinitesimal pequeno.
- Periodicidade - O mercado de energia elétrica tem períodos dominantes: sazonal, mensal, semanal e diário. Isto é muito favorável para discretizar os preços por blocos de análise através da técnica de *clustering* e mineração de dados (9). Ao agrupar os períodos diferentes, obtém-se um vetor de elementos periódicos cada um com uma volatilidade e uma correlação entre o prazo e outros elementos.
- Difusão de salto - a difusão de salto, Figura 2-(a), é a união dos movimentos de Poisson e Brownianos. Em determinados mercados o preço do ativo pode evoluir continuamente como um movimento browniano

geométrico, ou seja, log-normal, na maior parte do tempo, mas eventualmente pode sofrer grandes oscilações em decorrência de movimento raros (8, 10). No mercado de energia podemos entender os saltos ou grandes oscilações como picos de demanda ou falhas no SIN ou mesmo o esgotamento do carregamento em linhas de transmissão de interconexão entre submercados.

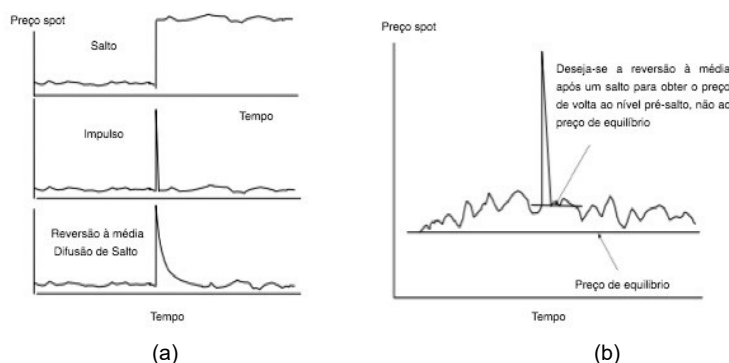


Figura 2 - (a) Reversão a média com difusão de salto e (b) Amortecimento do preço após um salto permeando o preço de equilíbrio (8)

- Reversão à média - a análise econômica revela que geralmente há algum tipo de preço de equilíbrio, neste caso o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) na entrega do produto, assim caso o preço de mercado prevalecente se diferencie deste PLD, verifica-se um comportamento de tal maneira, Figura 2-(b), que o mercado parece amortecer o movimento do preço em direção ao preço de equilíbrio. Isso é chamado de reversão à média (8).

3.2 - Volatilidade

A volatilidade é uma informação econômica de intensidade e frequência que representa as movimentações do valor de um determinado produto, dentro de um período de tempo, sendo possível interpretá-la *ex post* ou *ex ante*. Como *ex post* a volatilidade pode ser o desvio padrão dos retornos dos produtos (11, 12). Todavia, para obter uma previsão, ou seja *ex ante*, são necessárias aplicações que por vezes não são triviais. Ao analisar uma série de preços histórica (Figura 3) pode-se, por exemplo, constatar períodos “calmos” ou “mais agitados” e os *spikes*.

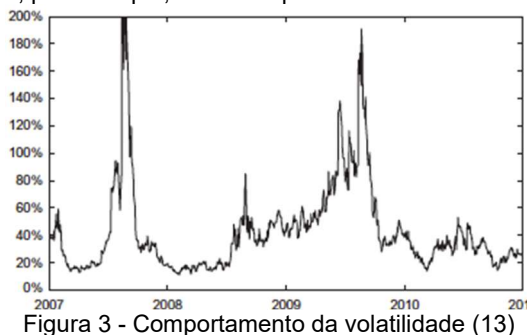


Figura 3 - Comportamento da volatilidade (13)

No comportamento dos produtos negociados no ambiente de mercado de energia elétrica brasileiro podem ser observados a existência de saltos abruptos no preço, os chamados *spikes*. Os *spikes* podem derivar, por vezes, da impossibilidade de estocar grandes blocos de energia em situações em que a redução da oferta provoca o aumento do preço, dado a incidência de maior inelasticidade do que elasticidade da demanda (14).

Diante da identificação e da sazonalização desses períodos na Figura 3, tem-se a volatilidade pelo período de análise. Pode-se usufruir aqui de técnicas de agrupamentos de volatilidade (*volatility clustering*) como o GARCH (*generalized autoregressive conditional heteroskedasticity*) e o EWMA (*exponentially weighted moving average*) (12). Os modelos da família ARCH supõem que a variância condicional depende de retornos passados, já o modelo de volatilidade estocástica (MVE) não faz esta suposição. Para o MVE a volatilidade presente depende de valores históricos de volatilidade, mas é independente do histórico de retornos (15). Trabalhos como de (16) aplicaram modelos GARCH para *commodities* energéticas como petróleo e gás natural, apesar de terem uma estrutura de mercado em oligopólio regulado a similaridade é restrita, pois são estocáveis ao contrário da energia elétrica. Por sua vez, (17) analisaram a volatilidade do preço da através do uso de variações do modelo do tipo GARCH e da metodologia *Markov-Switching*, testando vários modelos e procedimentos econométricos, concluindo que para a *commodity* de energia a volatilidade dos preços exhibe fortes sinais de memória longa e efeitos assimétricos. Portanto, independentemente de qual modelo de volatilidade é aplicado para medir e prever a volatilidade dos

preços, é essencial primeiro testar a distribuição de retorno mais adequada. Os modelos de volatilidade baseados em GARCH são os mais comumente usados, porém não há um aspecto conclusivo ou mesmo definitivo.

Deste modo, possivelmente para a *commodity* a energia elétrica o processamento é não-Gaussiano (12, 16, 17). Mas, pode ser útil o uso de Filtro de Partículas para o processamento, assim como maximização da verossimilhança, por uma função densidade Poisson-Gaussiana. Alguns modelos sugeridos, por (12), são:

- o processo de reversão com saltos e volatilidade determinística;
- o processo de reversão com saltos e com mudança de regime; e
- o processo de reversão com saltos e volatilidade estocástica.

O primeiro modelo se baseia em processos Brownianos adaptados de Medida Marginal Equivalente (MME) com distribuição de Poisson; o segundo modelo considera que a mudança de regime é observada em períodos que os preços estão fora de sua normalidade, sendo obtida por *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC); e o terceiro usufrui de métodos heurísticos incorporando as mudanças da demanda por energia elétrica.

4.0 – INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL APLICADA

As técnicas de *machine learning* podem ser classificadas pela forma de aprendizado: supervisionado (classificação, regressão); não-supervisionado (associação, *clustering*); e por reforço (*Q-learning*) (18, 19). Existem diversos métodos e técnicas que podem ser aplicados em *machine learning* e inteligência computacional. Dentre eles, um método abordado no artigo é o *clustering* – agrupamento de dados. Em geral, o *clustering* analisa e categoriza os dados disponíveis com base em critérios nos quais as mesmas amostras em uma categoria encontrarão diferenças máximas com as amostras em outras categorias (9). Os algoritmos de *cluster* são projetados para agrupar informações baseadas em similaridade e eles têm sido aplicados em diferentes casos, mas, principalmente, na extração de informações de maneira não-supervisionada (20).

Para aplicação no mercado de energia elétrica, a quantidade de informações torna inviável a operacionalidade manual, deste modo um conjunto de técnicas, denominado mineração de dados (*Data Mining*), com o objetivo de exploração de dados, para identificar padrões e tendências em mercados se mostram ferramentas extremamente úteis. As técnicas de *data mining* ganharam popularidade em virtude da interpretação de dados (21).

4.1 – Aplicação e resultados

As ferramentas de inteligência computacional foram aplicadas para quatro variáveis: preço, volume, energia natural afluyente e precipitação, considerando para cada produto o volume de negociação, $v_t [MWh]$, no dia, t ; os preços médio, $s_t^{med} [R\$]$, máximo, $s_t^{max} [R\$]$, mínimo, $s_t^{min} [R\$]$, de abertura, $s_t^{abr} [R\$]$ e de fechamento, $s_t^{fch} [R\$]$, no dia, t ; a energia natural afluyente bruta observada, $ENA_t^{brut. obs} [MW_{med}]$ no dia, t ; e a precipitação acumulada prevista para os próximos 15 dias, $P_{t+15}^{acm. prev} [mm]$.

As informações de preço foram obtidas através do Balcão Brasileiro de Comercialização de Energia (BBCE) para o submercado SE/CO, com a finalidade de encontrar comportamentos cíclicos ou mesmo similares por meio de técnicas de *clustering*, quando confrontados com o comportamento correlatado da precipitação acumulada prevista sob uma prospecção de 15 dias. O horizonte de tempo analisado foi o maior possível diante da consistência de informações, porém, neste trabalho, são oriundos do período de 24/06/2019 à 11/08/2021, discretizados diariamente: preço médio do dia, t , precipitação prevista acumulada a partir do dia, t , e volume no dia, t . As informações de ENA bruta observada foram coletadas diariamente para o mesmo período junto ao Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS). As informações sobre as precipitações foram coletadas pelo cenário *ECWMF-ENS* e trabalhadas individualmente e coletivamente para as bacias/sub-bacias: Araguaia, Grande, Paraná, Paranaíba, Paraíba do Sul, Paranapanema, São Francisco, Teles Pires, Tiete, Curuá-Una, Iguaçu e Tocantins. A escolha destas regiões hidrográficas ocorreu em virtude das importâncias direta, para o submercado analisado, e indireta, ao considerar pressões sobre o comportamento de preço, fruto de gargalos de transmissão ou de importação/exportação entre submercados.

O tempo de vida de cada produto energético é considerado do primeiro ao último registro de transação, por meio do preço $[R\$/MWh]$ e do volume transacionado $[MW_{medio}]$. A precipitação prevista acumulada $[mm]$ é correlata ao período de cada produto, sendo organizada de maneira coletiva, totalizando as precipitações individuais das bacias, porém não-sazonalizadas. Desde modo, a Figura 4 apresenta as escalas de preço e de precipitação prevista acumulada, sendo a escala de volume omitida em função da sua magnitude face a ordem de valor do preço.

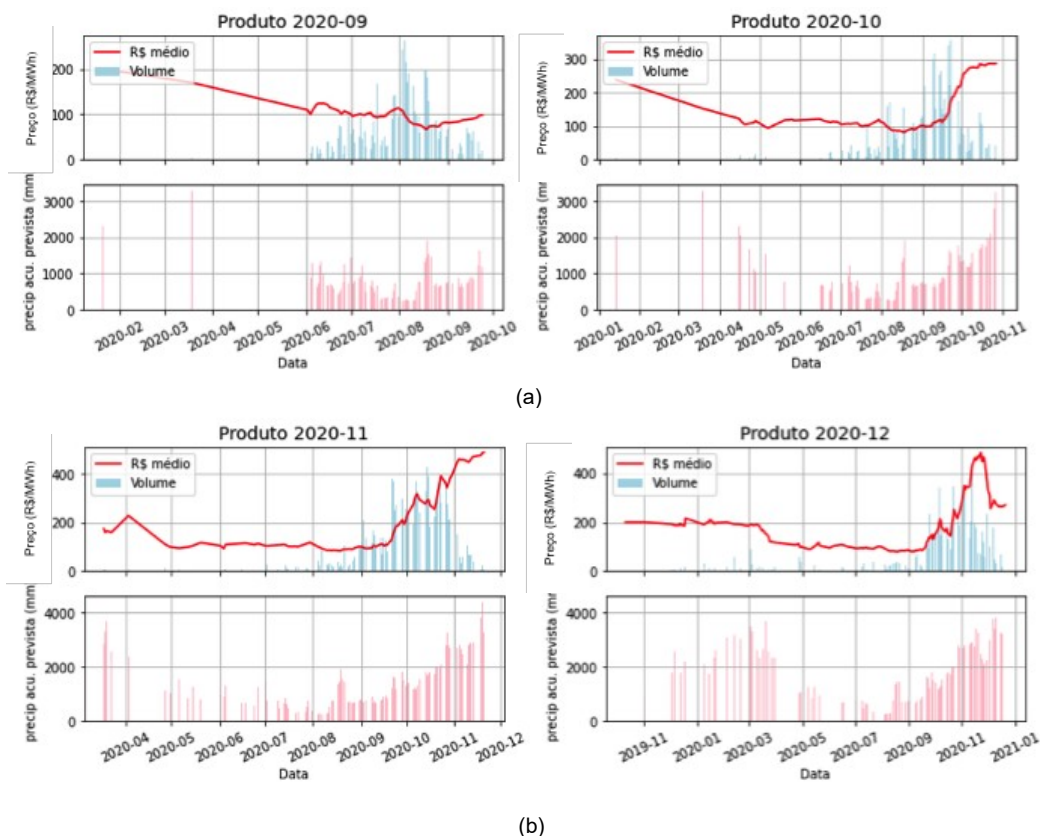


Figura 4 – (a) Comportamento dos produtos set-out/2020 e (b) nov-dez/2020 associado à precipitação prevista

Como pode ser observado junto ao produto setembro/2020, Figura 4-(a), a direção do movimento do preço ora é inversa ao movimento da precipitação e, ora não. De maneira análoga, nos produtos outubro, novembro e dezembro/2020, Figura 4-(b), verifica-se um movimento ascendente do preço face a ascendência da precipitação prevista acumulada próximo a liquidação do produto, porém com forte ascendência do volume negociado. Diante disso, em que pese uma relação intuitiva e inversa entre a precipitação prevista e o preço, esta análise não pode excluir o movimento do volume transacionado de forma sistêmica. Cabe ressaltar que os volumes transacionados não são unicamente exclusivos de agressões de compra ou de venda, mas, sim de ambas as possibilidades, e que a não-sazonalização das informações de precipitação tem influência na interpretação do movimento e direção do preço.

Deste modo, pode ser necessária uma análise sistêmica para obter a direção do movimento de preço, como o deslocamento do preço, $s_{t+\Delta t}^{med}$, a precipitação acumulada prevista sazonalizada ou as agressões no mercado. Entretanto, deve-se considerar que as análises referentes ao comportamento e o movimento dos preços face a precipitação ainda são preliminares e carecem de um aprofundamento, pois a não-precipitação prevista não afeta de mesma forma o preço quanto na existência de precipitação prevista, desconsiderando períodos de estiagem de forte impacto.

Outra maneira de analisar a interdependência entre as variáveis é aplicar as técnicas de inteligência computacional com a finalidade de verificar a correlação. O coeficiente de correlação possui significância estatística e o seu sinal indica a direção do comportamento das variáveis em estudo, já a magnitude do coeficiente indica a extensão da relação. Dentre os métodos mais utilizados e abordados, neste artigo, estão os coeficientes de correlação de *Pearson* e de *Spearman* (Figura 5). A correlação de *Pearson* trata de uma relação linear entre variáveis contínuas e o de *Spearman* de relação monotônicas linear ou não-linear entre variáveis contínuas ou ordinais. O coeficiente de *Spearman* pode contribuir mais assertivamente, pois as variáveis em estudo (preço, volume e precipitação) tendem para um movimento na mesma direção relativa, mas não necessariamente a uma taxa constante (22).

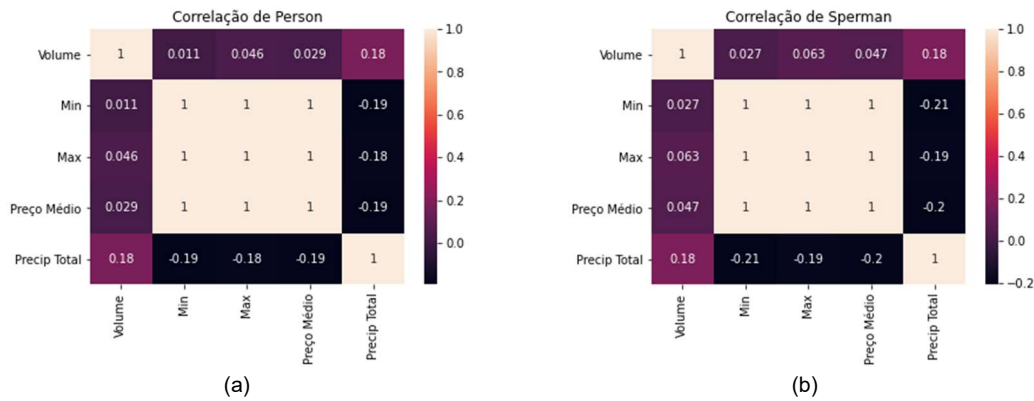


Figura 5 - Correlação de (a) *Pearson* e de (b) *Sperman* entre preço e precipitação

Observa-se, na Figura 5, a correspondência inversa entre o preço e a precipitação prevista, apesar de baixa. Na análise estatística podem existir pares de variáveis que apresentam forte dependência natural, mas que possuem correlação baixa e isto não compromete a análise qualitativa dos fenômenos. Nota-se, na correlação de *Spearman*, Figura 5-(b), uma relação mais intensa entre a precipitação prevista acumulada total (considerando todas as bacias) e o preço mínimo, indicando a tendência de que uma redução do preço mínimo é proporcionalmente maior que a redução do preço máximo diante de um aumento na precipitação prevista. Porém, cabe atentar para não-sazonalização da informação de precipitação e que a informação de preço é “um recorte” diante da amplitude do mercado de energia, pois, por exemplo, não são considerados informações de leilões e negociações bilaterais fora do ambiente da BBCE.

De forma análoga ao realizado para precipitação prevista acumulada de todas as bacias escolhidas, também, foi efetuado para cada bacia individual, Figura 6-(a), pelo coeficiente de *Spearman*. Outrossim, a ENA observada das bacias foi confrontada com o preço médio do submercado SE/CO com a finalidade de verificar a correlação entre os fenômenos econômico e ambiental, Figura 6-(b).

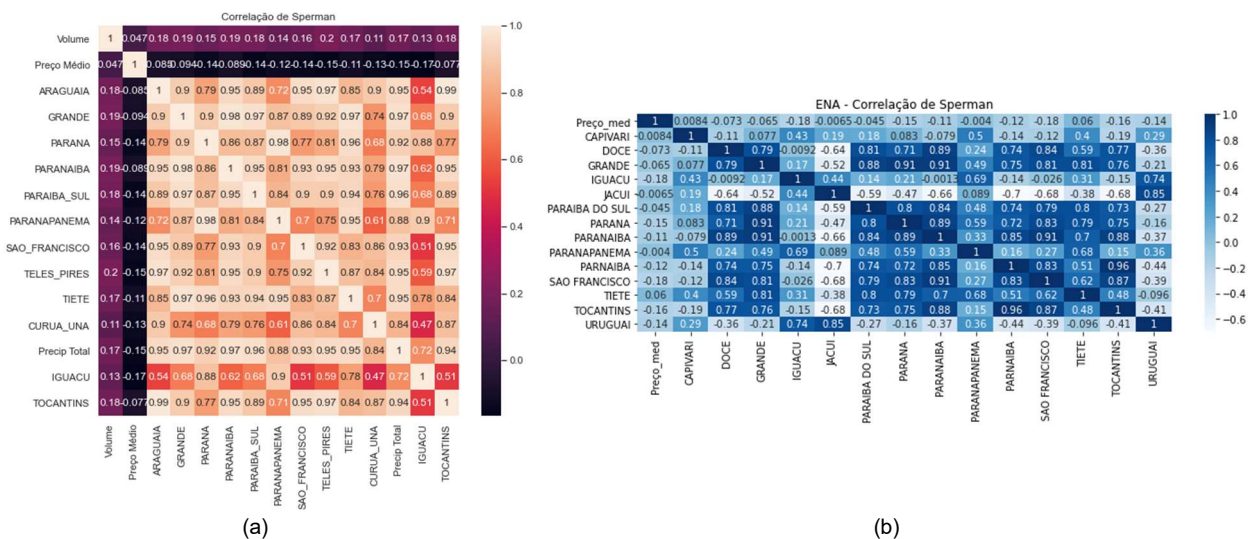


Figura 6 – (a) Correlação de *Pearson* e (b) de *Spearman* entre o preço médio e a precipitação prevista

Nesse sentido, para o coeficiente de *Spearman* entre o preço médio e a precipitação prevista acumulada, Figura 6-(a), as bacias Teles Pires e Iguaçu demonstram maior sensibilidade ao preço. Porém, ressalva-se que, ao analisar as correlações individuais, as bacias hidrográficas da região Sul não possuem uma sazonalidade tão característica quanto às bacias da região Sudeste, por exemplo. Deste modo, ao não-sazonalizar as informações de precipitação, pode-se distorcer ou, ao menos, comprometer uma análise quantitativa, entretanto a análise qualitativa pode revelar a interdependência dos fenômenos. Por sua vez, ao verificar o coeficiente de correlação de *Spearman*, Figura 6-(b), entre os fenômenos de preço e de ENA, as bacias Iguaçu, São Francisco e Tocantins indicam uma maior sensibilidade. Portanto, constata-se que a não-sazonalização da precipitação contribui diretamente para um resultado aquém do esperado. Conquanto, o comportamento do preço também deve ser ponderado sob a Perspectiva Econômica (23) do agente de mercado, pois o movimento do preço é fruto do contexto social e econômico deste agente na tomada de decisão. Outrossim, tem-se a ENA como um fenômeno de maior relevância, sendo uma potencial candidata como variável ao modelo de planejamento integrado.

5.0 - CONCLUSÃO

Um modelo de análise para o mercado de energia elétrica deve prever a captura dos pontos críticos da curva de preço futuro ocorridos no passado e expor, com confiabilidade, o comportamento da curva futura de um contrato para um período a frente. No entanto, muitos modelos financeiros projetados para *commodities* não podem ser adaptados devido às idiossincrasias da estrutura do mercado de eletricidade. Conclui-se que a modelagem analítica do comportamento do preço da energia é muito mais complexa que o de outras *commodities*. Usualmente, tem-se a característica não-Gaussiana gerada por saltos e/ou *spikes* e/ou volatilidade estocástica, deste modo, ao usufruir de dados históricos dos preços como variáveis observáveis, existe a necessidade de processamento para estimação dos preços à vista.

No escopo de curto prazo, cerca de 15 dias, a precipitação prevista pode influenciar os movimentos de preço e o comportamento dos agentes de mercado, entretanto isto não é imperativo. O fenômeno da precipitação tem relação natural com o recurso primário para produção de energia hidrelétrica, mas o impacto disto no preço, provavelmente, deve ser avaliado de forma dinâmica e sistêmica com outros fenômenos como a Perspectiva Econômica e agressões de agentes de mercado, o volume ou as anomalias meteorológicas.

No escopo de médio prazo, a ENA se configura como uma variável imprescindível para analisar os movimentos de preço. Contudo, as vazões naturais afluentes aos reservatórios e às sub-bacias possuem forte dependência do binômio solo-água e da gestão e dos usos múltiplos dos recursos hídricos, caracterizando-se, portanto, com uma complexidade não-trivial.

Os modos de produção e de comercialização de energia elétrica podem ser entendidos como uma construção social, visto que são frutos dos valores da sociedade em que estão e são condicionados pela forma de aproveitamento do capital natural hídrico e pela expectativa e frustração de preço. A energia pode ser tratada como uma mercadoria (*commodity*), uma necessidade social ou um recurso estratégico ou ecológico. E, claro, a tomada de decisão é muito influenciada pelo modo como ela é compreendida pelos agentes socioeconômicos que participam desse processo. Neste contexto, este artigo contribui para o planejamento integrado sob a estrutura de mercado, não sobre o preço da energia em si ou estratégias para o seu comércio, mas para a compreensão das variáveis e dos fenômenos intervenientes em ambiente do mercado futuro.

6.0 – REFERÊNCIAS

- (1) JANNUZZI, G. M., SWISHER, J. N. P., e REDLINGER, R. Y., *Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Oferta, Demanda e suas Interfaces*. Campinas: IEI - Brasil, 2018.
- (2) SICA, E. T., "Planejamento Integrado de Recursos Hídricos para Geração de Energia Elétrica: um sistema de apoio à decisão via multicritério e dinâmica de sistemas," Doutor em Engenharia Elétrica Tese, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- (3) SICA, E. T. e CAMARGO, C. C. d. B., "Planejamento integrado multiobjetivo da geração de energia elétrica para uma bacia hidrográfica considerando a outorga aos usos múltiplos e os agentes do setor de recursos hídricos," presented at the XX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 2009.
- (4) SOLOW, R. M., "The economics of resources or the resources of economics.," presented at the American Economic Review, 1974.
- (5) FAUCHEUX, S. e NOËL, J., *Economia dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente*. Lisboa: Instituto Piaget, 1995.
- (6) KAHNEMAN, D. e TVERSKY, A., "Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk," *Econometrica*, vol. 47, pp. 263-291, 1979.
- (7) PAULI, G. e SICA, E. T., "An Analysis on the Use of IoT Devices in the Integrated Energy Resources Planning," in *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, 2018, pp. 1-4.
- (8) HARRIS, C., "Eletrecity Markets: Pricing, Structures and Economics.," 2006.
- (9) GOLALIPOUR, K., AKBARI, E., HAMIDI, S. S., LEE, M., e ENAYATIFAR, R., "From clustering to clustering ensemble selection: A review," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 104, p. 104388, 2021/09/01/ 2021.
- (10) KEGNENLEZOM, M., TAKAM SOH, P., MBELE BIDIMA, M. L. D., e EMVUDU WONO, Y., "A jump-diffusion model for pricing electricity under price-cap regulation," *Mathematical Sciences*, vol. 13, pp. 395-405, 2019/12/01 2019.
- (11) PILIPOVIC, D., *Valuing and Managing Energy Derivatives*: McGraw-Hill, 2007.
- (12) AIUBE, F. A. L., *Modelos quantitativos em finanças com enfoque em commodities*. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- (13) ARISMENDI, J. C., BACK, J., PROKOPCZUK, M., PASCHKE, R., e RUDOLF, M., "Seasonal Stochastic Volatility: Implications for the pricing of commodity options," *Journal of Banking & Finance*, vol. 66, pp. 53-65, 2016/05/01/ 2016.

- (14) HAMBLY, B., HOWISON, S., e KLUGE, T., "Modelling spikes and pricing swing options in electricity markets," *Quantitative Finance*, vol. 9, pp. 937-949, 2009/12/01 2009.
- (15) MORETTIN, P. A. e TOLOI, C. M. C., *Análise de séries temporais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- (16) MANERA, M., NICOLINI, M., e VIGNATI, I., "Modelling futures price volatility in energy markets: Is there a role for financial speculation?," *Energy Economics*, vol. 53, pp. 220-229, 2016/01/01/ 2016.
- (17) HALKOS, G. E. e TSIRIVIS, A. S., "Effective energy commodity risk management: Econometric modeling of price volatility," *Economic Analysis and Policy*, vol. 63, pp. 234-250, 2019/09/01/ 2019.
- (18) BONACCORSO, G., *Machine Learning Algorithms: a reference guide to popular algorithms for data science and machine learning*. Birmingham: Packt Publishing 2017.
- (19) DEISENROTH, M. P., FAISAL, A. A., e ONG, C. S., *Mathematics for machine learning*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- (20) PENTA, A. e PAL, A., "What is this Cluster about? Explaining textual clusters by extracting relevant keywords," *Knowledge-Based Systems*, vol. 229, p. 107342, 2021/10/11/ 2021.
- (21) SILVA, A. S. d., "Análise e simulação de mercados locais de energia elétrica," Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP/IPP) Porto (Portugal), 2019.
- (22) ORIGUELA, L. A., "Estudo da influência de eventos sobre a estrutura do mercado brasileiro de ações a partir de redes ponderadas por correlações de Pearson, Spearman e Kendall " Mestrado em Administração de Organizações, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2018.
- (23) TVERSKY, A., "Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty," ed, 2000, pp. 44-66.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela UTFPR ; Doutor em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, pela UFSC. Professor do Instituto Federal de Santa Catarina lecionando para os cursos de Engenharia Elétrica e Tecnologia de Sistemas de Energia. Coordenador do Laboratório de Planejamento Integrado de Recursos Energéticos e atuando em modelagem e simulação de sistemas de suporte à decisão multicritério e otimização multiobjetivos aplicados nas áreas de Recursos Energéticos Distribuídos, de Recurso Hídricos, de Confiabilidade de Sistemas, de Teoria Econômica aplicada do Setor Elétrico e de Economia e Regulação dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente.

(2) SÉRGIO AVILA

Professor no Instituto Federal de Santa Catarina. Líder do Grupo de Pesquisas em Computação Científica para Engenharia (PECCE), que envolve pesquisadores do IFSC e empresas da Associação Catarinense de Empresas de Tecnologia (ACATE). Pesquisador associado ao Laboratório de Redes Inteligentes (LGrid) da Escola Politécnica da USP. Atua também como consultor para o MEC e a FAPESC. Trabalha no desenvolvimento de soluções para o monitoramento e prognósticos de comportamento em sistemas elétricos, o que envolve instrumentação, modelagem numérica, otimização e algoritmos de inteligência computacional. A intenção é transformar dados em informação útil para tomadas de decisão mais assertivas. ifsc.edu.br/pecce

(3) ÉRIC LOURENÇO AMÉRICO

Atualmente estudante de Engenharia Elétrica no Instituto Federal de Santa Catarina - 5º semestre. Formado Técnico em Eletrônica em SENAI - SC. Possui conhecimentos em programação Python, com ênfase em inteligência computacional, entre outras linguagens de programação, além dos conhecimentos em elétrica e eletrônica em geral.

(4) LUCAS YUKI IMAMURA

Formado como Técnico em Eletrônica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) Câmpus Florianópolis e atualmente cursando Ciência da Computação na A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Tem experiência na área de Ciências da computação, com ênfase em técnicas de Inteligência Computacional.

(5) KAREM VIEIRA PAES DE LIMA

Ingressou curso de engenharia elétrica elétrica no IFSC/SC em 2017.2, trabalhou como trainee técnica no ONS, na gerência de tempo real. Em janeiro de 2020, iniciou um projeto de pesquisa no Laboratório de Planejamento Integrado de Recursos Energéticos Distribuídos no IFSC. Também em de 2020, iniciou estágio na CGTE Eletrosul na área de Manutenção da Geração, executando atividades de análise de dados. Atualmente, é bolsista pelo IFSC no projeto de desenvolvimento tecnológico 'FLOW recomendação inteligente aplicada ao mercado de energia elétrica – uma prova de conceito' pela EMBRAPII.

(6) BRUNA AMÉRICO TRENTO

Graduanda de Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, com interesse nas áreas de estudos sobre mercado de energia elétrica e gestão da qualidade. Com passagem por grandes empresas do setor no estado de Santa Catarina, como CELESC e CGT Eletrosul, ambas na área de comercialização de energia. Atualmente, estagiando na área de processos e qualidade da Engie Soluções. Pesquisadora na área de Planejamento Integrado de Recursos Energéticos, desenvolvendo um projeto que estuda a influência de variáveis meteorológicas e hidrológicas nos preços no mercado de curto prazo.

(7) KATHIUSSIA SEVERGNINI

Graduou-se em Engenharia Bioenergética em 2012 pela Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC). Atualmente é Analista de Mercado na Flow Energia exercendo atividades relacionadas a formação de preços no Ambiente de Contratação Livre de Energia.

(8) MURILO PEREIRA SOARES

Engenheiro Eletricista formado pela UFJF, atua no setor elétrico desde 2005. Possui mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio, com foco em otimização de sistemas hidrotérmicos. Atuou no ONS durante 8 anos na área de metodologias e modelos de otimização energética. Atua diretamente na área de análise de mercado desde 2013, inicialmente pela Statkraft, e posteriormente pela Norsk Hydro Energia, onde foi o responsável pela área de análise de mercado durante 2 anos e meio. É co-fundador da Flow Energia, onde é responsável pela área de análise de mercado e pesquisa de novos portfólios e metodologias.

