



XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

AB/XXX/YY

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

## GRUPO 6

### GRUPO DE ESTUDO DE COMERCIALIZAÇÃO, ECONOMIA E REGULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- C5

#### A IMPORTÂNCIA DA CORRELAÇÃO E DA VOLATILIDADE NA MODELAGEM DE RISCO DE MERCADO PARA CARTEIRAS DE ENERGIA ELÉTRICA

**HENRIQUE LEME FELIZATTI  
DCIDE LTDA**

**PATRICIO MARTIN HANSEN  
DCIDE LTDA**

#### RESUMO

A prática dominante no cálculo quantitativo do risco de mercado nas principais empresas do setor Elétrico Brasileiro se baseia no conceito de marcação a mercado periódica de uma carteira de energia contra uma curva forward de preços. O risco é medido como o próprio potencial de variação do valor do ativo sob gestão, entre um intervalo e outro, decorrente de variações nos preços dos ativos ou volumes de energia principalmente.

Este artigo aborda as características de volatilidade e correlação das curvas Forward de preços de energia, que são aspectos fundamentais para a modelagem de risco em portfólios, apresentando uma estrutura para capturar estas características.

Mostramos que a não consideração destes fatores podem levar a graves problemas de estimação do valor em risco, tendendo a subestimá-los em carteiras típicas de energia.

#### PALAVRAS-CHAVE

Risco, Curva Forward, Preços, Volatilidade, Correlação

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

O maior rigor nas demandas de governança corporativa tem levado as empresas do setor a aprimorarem sua estrutura interna de gestão de risco de mercado de forma a incorporar o conceito de gestão a futuro de portfólios ao processo decisório, usando métricas quantitativas que refletem a incerteza nos resultados vinculados com estas carteiras de energia.

A gestão a futuro de portfólios de energia pressupõe que exista um mercado forward com liquidez suficiente para permitir o fechamento de posições de energia e que, portanto, o valor do ativo deve ser calculado usando o conceito de marcação ao mercado, ou seja, o valor de uma carteira de energia em determinado período é calculado como a multiplicação entre a curva forward de preços de eletricidade de determinado período e a posição de energia associada.

Utilizando o conceito de marcação ao mercado é possível modelar as variações do resultado financeiro de determinada carteira em função da variação da curva forward e, fazendo com que o cálculo de risco de mercado para determinado horizonte seja medido a partir da estimação da distribuição condicional conjunta dos preços forward para os produtos de energia considerando sua volatilidade e correlações condicionais dinâmicas.

A modelagem da distribuição condicional conjunta da curva forward depende principalmente do correto entendimento da volatilidade associada com os componentes desta curva e da correlação entre os produtos de energia.

Utilizando os dados do Pool de preços da Dcide este trabalho mostra que existe correlação positiva significativa entre as variações dos preços forward de energia para diversas maturidades e que estas correlações variam ao longo do tempo, demonstrando que a não consideração deste fator leva a medição incorreta do risco do portfólio, fazendo com que as métricas de risco não capturem corretamente a magnitude das potenciais perdas.

Observamos que as matrizes de correlação dos preços forward formam principalmente dois blocos, onde o primeiro é composto pelos produtos de curto e médio prazos, com suprimento em até doze meses, e o segundo pelos produtos de longo prazo, com suprimento a partir de doze meses. A correlação entre os grupos de médio e longo prazos é moderada, porém também pode variar em função do tempo.

Adicionalmente, mostramos que a volatilidade da curva forward decai em função da distância ao suprimento, porém a magnitude da volatilidade também é dinâmica no tempo de maneira a formar blocos de variação de alta e baixa volatilidade.

Sugerimos uma forma flexível de modelar a distribuição conjunta condicional dos preços baseada na função de acoplamento gaussiana com distribuições marginais estimadas não-parametricamente pela suavização Kernel e que considera a volatilidade e a matriz de correlação de forma dinâmica através da abordagem Risk-Metrics. A estimação da volatilidade e correlações dinâmicas é feita através de uma suavização das variações quadráticas das observações passadas, onde o parâmetro de suavização é calibrado através de back-tests.

Ilustramos a aplicabilidade destes modelos em carteiras de energia com horizonte de gestão de até cinco anos, demonstrando que as correlações são essenciais para refletir o efeito de pulverização de posições e que posições unidirecionais, com sobras ou déficits em todo o horizonte, geram um efeito de potencialização no risco de mercado, sugerindo que estratégias de posições opostas de energia tendem a ter menor risco agregado.

O restante do trabalho está dividido da seguinte forma. Na seção 2 descrevemos o conceito de curva forward de energia e seu processo de formação para o setor elétrico. A definição de volatilidade e correlação entre produtos Forward é apresentada na seção 3 assim como a discussão de algumas formas de estimação.

Apresentamos na seção 4 a metodologia para modelagem da distribuição conjunta dos preços Forward, assim como questões relacionadas com sua estimação e operação.

Na seção 5 apresentamos a aplicação da metodologia a carteiras de energia elétrica com até cinco anos de horizonte e as conclusões são apresentadas na seção 6.

## 2.0 - PREÇOS FORWARD

A curva Forward de preços de eletricidade reflete o preço da energia a ser suprida em um momento futuro  $h$  avaliada em um tempo  $t$  e pode ser denotada por  $F_{t,h}$ , uma função de duas quantidades, onde  $h$  é geralmente denominado maturidade e  $t$  é o tempo de medição deste preço.

O conceito de curva Forward é amplamente conhecido e aplicado em diferentes mercados ao redor do mundo (1) e é muito utilizada principalmente nos processos de planejamento financeiro, gestão da comercialização de energia, marcação ao mercado e gestão de risco.

A captura e interpretação da curva Forward para o mercado brasileiro de energia deve levar em consideração as características particulares do setor, principalmente o fato de ser um mercado tipicamente de balcão, com negociações bilaterais que não ficam disponíveis para o mercado como um todo.

Adicionalmente, os contratos de eletricidade não são padronizados, fazendo com que duas operações para o mesmo período de suprimento não sejam comparáveis por diversos motivos, incluindo o custo de oportunidade, risco de crédito, inclusão de flexibilidades contratuais, engenharia financeira, entre outros.

Como existem diversos produtos de eletricidade comercializados no setor, também existem diferentes curvas Forward, com preços distintos para produtos advindos de diferentes classes de fontes de energia e submercados, da qual se destacam as curvas Forward para energia advinda de fonte convencional no submercado SE/CO, conhecida como curva Convencional SE, e a que reflete preços para energia Incentivada com 50% de desconto na TUSD também no submercado SE/CO, chamada de I50% SE. Como estes são os produtos mais líquidos do setor, as demais combinações de fonte e submercados costumam ser definidas como um diferencial destas duas curvas, os chamados prêmios.

Ao contrário do PLD (Preço de Liquidação de Diferenças) as curvas Forward são definidas basicamente pelas leis de oferta e demanda, onde os agentes de mercados se interagem e, através de um processo de consenso, definem um preço de mercado em cada tempo  $t$ , para cada maturidade  $h$ .

De fato, é uma atividade essencial para empresas do setor ter acesso a uma curva Forward para questões de valoração de seus ativos de energia a cada momento do tempo. Desta forma, cada agente de mercado possui internamente um processo de construção de sua curva Forward que reflete, não a que preço se deseja vender ou comprar energia, mas sim qual o valor de referência da energia neste momento, ou seja, a curva de marcação ao mercado, formando a entrada principal nos processos de precificação, planejamento e gestão de risco.

Essas curvas individuais geralmente são construídas pelas áreas de Front Office que interagem diretamente com o mercado. No entanto, principalmente para atender aos propósitos de governança corporativa esta curva deve ser isenta de componentes estratégicos, além de ter que manter uma estrutura padrão que possa ser comparada entre cada período de medição e ter constância, de maneira a atender aos reportings periódicos das empresas.

A forma que tem se apresentado a mais bem-sucedida para construir uma curva Forward para o mercado de eletricidade brasileiro é aquela baseada no conceito de curvas de consenso, que partem das curvas oficiais dos agentes e, calculando alguma média ponderada, chegam em uma curva de consenso, que refletem uma visão agrupada do mercado.

Ter referências Forward de qualidade é uma etapa essencial para a execução de processos relacionados com risco de mercado porque o preço subjacente a carteiras de energia é o preço Forward, dado que determinado agente pode tomar a decisão de contratação em cada tempo  $t$  para fechamento de uma posição de energia em data de suprimento futuro  $h$ , não precisando esperar chegar o período de suprimento. Essa característica, que pressupõe a existência de liquidez de mercado, muda completamente o perfil de risco da carteira de energia, porque a volatilidade das curvas Forward tendem a ser significativamente menores que a dos preços Spot, principalmente em produtos de energia com suprimento mais distantes.

De fato, a definição de risco é o potencial de variação do resultado financeiro de uma empresa do atual período até o próximo, que é dado basicamente pelo potencial de variação dos preços Forward do atual período até o próximo, medido pela volatilidade dos preços Forward.

### 3.0 - METODOLOGIA

A gestão de risco pressupõe que saibamos modelar a distribuição conjunta dos instrumentos subjacentes aos portfólios de interesse, e partindo deste modelo realizar a estimação de métricas de risco para as quais se apliquem as diretrizes de governança corporativa e alçadas das empresas. No caso específico do setor elétrico brasileiro, é necessário conhecer a distribuição conjunta dos preços de diferentes maturidades.

Existem diversas abordagens para a obtenção de uma distribuição de probabilidade conjunta para os preços de mercado, algumas altamente complexas e outras simples demais. Para conseguir capturar as principais características importantes para a gestão de risco e assumindo uma estrutura que de certa forma é realista para determinada aplicação costuma-se focar a atenção principalmente nos dois primeiros momentos desta distribuição multivariada conjunta, que se referem à média, os desvios-padrão e a matriz de correlação entre os produtos.

Este trabalho segue esta linha e sugere modelar a distribuição conjunta dos preços através de uma cópula gaussiana, assumindo marginais definidas por uma densidade kernel e com volatilidade e correlações dinâmicas estimadas usando a abordagem Risk Metrics, que assume uma suavização exponencial para a volatilidade e correlações.

Nas subseções seguintes apresentamos o conceito de volatilidade e correlação e como aplicar a metodologia Risk Metrics para este contexto, definindo a seguir um modelo multivariado para as variações de preços de mercado, que servirão como base para o cálculo de métricas de risco.

#### 3.1 VOLATILIDADE E CORRELAÇÃO

Uma forma de definir volatilidade é baseada no desvio padrão da variação da curva Forward em questão, organizada em função à maturidade do produto de energia. Ressalta-se que as curvas devem ser organizadas de acordo a distância ao suprimento, ou seja, curvas com mesmo  $h$ , já que o risco de mercado é função da maturidade do produto e não ao calendário subjacente ao qual ele se refere.

A volatilidade é comumente apresentada de maneira relativa ao produto subjacente e é possível converter volatilidade em diferentes frequências de tempo.

Formalmente, seja  $F_{t,h}$  o valor da curva Forward para a maturidade  $h$  medida no tempo  $t$  e seja  $x_{t,h} = \frac{F_{t,h} - F_{t-1,h}}{F_{t-1,h}}$  a variação relativa do tempo  $t-1$  ao tempo  $t$ . A volatilidade no tempo  $t$  é definida como  $\sigma_{t,h} = \sqrt{E_{t-1}[x_{t,h}^2] - E_{t-1}[x_{t,h}]^2}$  onde  $E_{t-1}[\cdot] = E_{t-1}[\cdot | \mathfrak{I}_{t-1}]$  é a esperança condicional a toda informação disponível até o tempo  $t-1$ ,  $\mathfrak{I}_{t-1}$ . Como a volatilidade depende do tempo, ela possui uma estrutura dinâmica.

A volatilidade de um produto de energia é uma métrica de variação que captura o quão distante do preço atual pode ficar o preço do próximo período, por esse motivo, quanto maior a variação, maior o risco de mercado.

A abordagem mais simples para a estimação de volatilidade é calcular o desvio-padrão das variações históricas de determinado produto Forward, conhecida como volatilidade histórica ou não condicional, porém esta abordagem assume que a volatilidade relativa é constante.

Um método de estimação da volatilidade condicional muito utilizado pela sua facilidade de implementação e interpretação é a suavização exponencial, recomendada pelo Risk Metrics e que assume a seguinte estrutura para a volatilidade condicional  $\sigma_{t,h}^2 = \alpha \cdot \sigma_{t-1,h}^2 + (1 - \alpha) \cdot x_{t-1,h}^2$  que pode ser inicializada por  $\sigma_{0,h}^2 = \bar{\sigma}_h^2$ , sendo  $\bar{\sigma}_h^2$  a volatilidade história da variação do produto de maturidade  $h$ . O parâmetro pode ser calibrado via back-test, mas valores na faixa de 0,94 até 0,99 costumam ser as escolhas mais frequentes.

Existem, ainda diversas outros modelos para estimar a volatilidade incluindo modelos do tipo ARMA-GARCH, modelos de volatilidade estocástica, entre outros (2). Uma extensa literatura estudando as propriedades e problemas de cada um dos modelos está disponível, e foge do objetivo deste trabalho essa revisão. O desempenho de cada um desses modelos teria que ser avaliado para o caso do setor elétrico brasileiro.

Em casos de carteiras de energia formadas por produtos de apenas uma maturidade a modelagem da volatilidade é suficiente para estimar algumas métricas clássicas de risco, como o valor em risco. Porém, como a maioria dos portfólios de energia são formados por posições Forward em diversas maturidades, é essencial incorporar o efeito de correlação entre produtos para que a estimação do risco seja feita de forma realista.

A correlação condicional de dois produtos de energia elétrica pode ser definido como

$$\rho_{t,h,l} = \sqrt{\frac{E_{t-1}[x_{t,h} \cdot x_{t,l}] - E_{t-1}[x_{t,h}] \cdot E_{t-1}[x_{t,l}]}{\sigma_{t,h}^2 \cdot \sigma_{t,l}^2}}$$

As características da correlação entre os produtos de diferentes maturidades definem quão agrupados ou separados as variações de preços ocorrem, ou seja, se determinado produto se movimenta em uma ou outra direção e há correlação positiva com os demais produtos então existe uma chance maior dos demais produtos se movimentarem na mesma direção, em quantis similares da distribuição de probabilidade marginal destes produtos. Por este motivo, a estrutura de correlação entre as variações de preços define a consistência de trajetórias de preços, impactando fortemente na distribuição conjunta dos preços de mercado, e também nas métricas de risco derivadas de sua agregação.

Também existem uma série de modelos que podem ser utilizados na estimação da estrutura de correlação de forma dinâmica, como GARCH multivariados, o DCC, CCC, entre outros (2). A literatura também cuida de apontar as questões associadas com cada um destes modelos, principalmente o problema da dimensionalidade da estimação e da necessidade de muitos dados devido a quantidade de parâmetros (3).

Uma abordagem mais simplificada também é proposta pelo Risk Metrics para a estimação da estrutura da matriz de variância e covariância dos preços que segue da seguinte forma  $\Omega_t = \lambda \cdot \Omega_{t-1} + (1 - \lambda) \cdot X_{t-1} X_{t-1}^T$ , onde  $X_t$  é o vetor de variação de preços no tempo  $t$  e tem tamanho  $h$ , e a  $\Omega_t$  é a matriz de variância e covariância condicional.

### 3.2 O MODELO MULTIVARIADO

O teorema de Sklar define que toda distribuição multivariada pode ser escrita como uma função de acoplamento. Desta forma, escolhendo uma função de acoplamento podemos emular o comportamento de uma distribuição de probabilidade conjunta multivariada, o que nos permitiria modelar a distribuição conjunta dos preços de mercado.

A implementação da estrutura de cópula para trabalhar com modelagem econométrica tem sido bastante utilizada pelas empresas, principalmente em situações mais intuitivas como a escolha das cópulas gaussianas, que permitem justamente considerar a estrutura de correlação e volatilidade dinâmicas apresentadas na seção anterior (3).

Apesar de serem criticadas por não apresentarem dependência nas caudas, fato estilizado que é observado em diversos mercados financeiros, a cópula gaussiana tem se mostrado uma alternativa bastante eficiente para lidar com a distribuição multivariada conjunta, principalmente porque tem como parâmetros de entrada a matriz de variância e covariância, o que permite combinar as estimativas de volatilidade e correlação em um modelo conjunto para os preços de mercado.

Assumindo cópula gaussiana, o modelo conjunto para a variação dos preços de mercado pode ser escrito da seguinte forma. Seja  $x_{t,h} = \sigma_{t,h}\eta_{t,h}$  onde  $\eta_{t,h} \sim FD_h$  com  $E[\eta_{t,h}] = 0$  e  $V[\eta_{t,h}] = 1$

Então  $\underline{\eta}_t | \mathfrak{F}_{t-1} \sim \Theta(\underline{0}, \underline{\Sigma}_t)$  e portanto  $\underline{\eta}_t := (\Phi^{-1}(FD_1(\eta_{t,1})), \Phi^{-1}(FD_2(\eta_{t,2})), \dots, \Phi^{-1}(FD_p(\eta_{t,p})))$  onde  $FD_h$  é a função distribuição marginal do produto de energia na maturidade  $h$ ,  $\Theta(\underline{0}, \underline{\Sigma}_t)$  é a cópula gaussiana com matriz de variância e covariância dinâmica e  $\Phi$  é a função distribuição de probabilidade gaussiana padrão com  $p$  sendo o número de produtos de energia a serem considerados.

Podemos estimar a distribuição de probabilidade marginal usando a densidade Kernel gaussiana e estimar  $\underline{\Sigma}_t$  através de  $\underline{\Omega}_t$  seguindo a abordagem Risk Metrics descrita na seção 3.1

#### 4.0 - APLICAÇÃO

Para estudar a influência das premissas de volatilidade e correlações dentro nas métricas de risco serão utilizados as curvas Forward para energia Convencional SE/CO apuradas pela Dcide no período de 01/01/2012 a 20/03/2017.

A Dcide usa uma metodologia de curvas de consenso para formar suas curvas Forward de energia através de um Pool de agentes com mais de 40 empresas, representando os agentes mais comercialmente ativos do setor.

Os dados são disponibilizados em uma escala semanal desde janeiro de 2012 na estrutura de maturidade M+1, M+2, M+3, A+0, A+1, A+2, A+3 e A+4, onde M+i significa produto de energia com suprimento em  $i$  meses a frente da data de apuração da curva e A+i significa o produto de energia com suprimento em  $i$  anos a frente desta mesma referência. O produto A+0 é o produto fechamento do ano e reflete o produto medido da data de apuração até o final do ano.

Para questões de risco de mercado a importância está na variação dos preços de um período a outro, que precisam ser tratadas para retirar o efeito de mudança de produto calendário, que pode influenciar nas estimativas de volatilidade e correlação.

Essas variações calculadas semanalmente desde janeiro de 2012 para cada maturidade são mostradas na figura 1. Note que os produtos mais próximos ao suprimento são muito mais voláteis que os de mais longo prazo, fato conhecido em estruturas a termo e que também ocorre no mercado de energia brasileiro, de forma que o risco de posições mais próximas ao suprimento pode chegar a ser 12 vezes maior que em produtos de longo prazo.

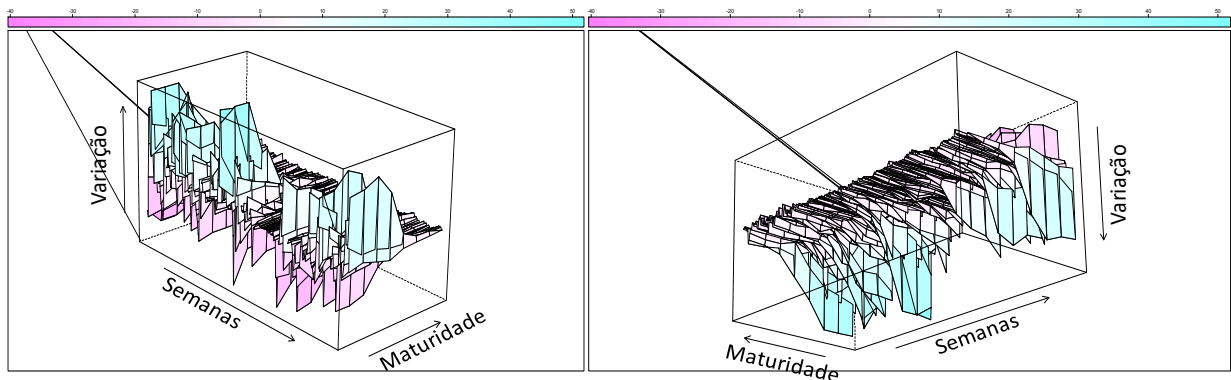


FIGURA 1 – Estrutura a termo da variação semanal das curvas Forward tratada para retirar o efeito de calendário e medida desde janeiro de 2017 até março de 2017. Fonte: Dcide.

Usando a metodologia apresentada na seção 3 estimamos as volatilidades associadas com dado produto Forward de energia utilizando um  $\alpha = 0,95$  para todos os produtos exceto M+1 e A+1, que tiveram parâmetros fixados em  $\alpha = 0,9$  e  $\alpha = 0,83$ , respectivamente.

Na figura 2 temos a evolução da volatilidade estimada para cada produto comparando com a volatilidade não condicional. O valor  $\alpha = 0,95$  é próximo ao sugerido pelo Risk Metrics, os demais valores foram estimados em função às análises de back-test como mostrado na tabela 1.

Tabela 1: Análise de Back-Test para a Volatilidade das variações da curva Forward

Produto	Alpha	Percentual de Valores que Excederam o Intervalo de Confiança 95%	p-valor do teste de proporções que (H0: p = 5%)	p-valor do teste de independência dos valores fora do Intervalo de Confiança de 95%
M+1	0,90	7,63	0,0763	0,1915
M+2	0,95	7,25	0,0725	0,7253
M+3	0,95	5,34	0,0534	0,0051
A+0	0,95	5,73	0,0572	0,1844
A+1	0,84	7,63	0,0763	0,0020
A+2	0,95	5,73	0,0572	0,1844
A+3	0,95	6,11	0,0610	0,0269
A+4	0,95	4,96	0,0496	0,0704

Note que as variações de preços de mercado passam por períodos de alta e baixa volatilidade, mas a volatilidade semanal dos produtos de longo prazo é sempre menor do que as dos produtos de curto prazo. Especificamente, a volatilidade do produto M+1 tende a variar em torno de 12% semanal, passando por períodos de alta e baixa volatilidade. O período de menor volatilidade foi associado com a época que os preços ficaram próximos ao teto, onde ele ficou estacionado por um longo período de tempo.

Já no produto A+4 a volatilidade pode ser dividida em dois períodos, e atualmente estamos passando por um período abaixo da volatilidade condicional, variando em um patamar em torno de 1%. Desta forma a variação de preços dos produtos de curto prazo é cerca de 12 vezes superior que a de longo prazo.

A figura 2 sugere que a volatilidade de fato varia no tempo, fato reconhecido pelos especialistas do setor, mostrando que a gestão de risco deve considerar esta característica. Desprezar a estrutura de variação do tempo da volatilidade pode fazer com que a métrica de risco subestime as perdas em determinados períodos e superestime em outros, gerando problemas de capital para cobertura do risco ou barrar operações de mercado que poderiam ser atrativas.

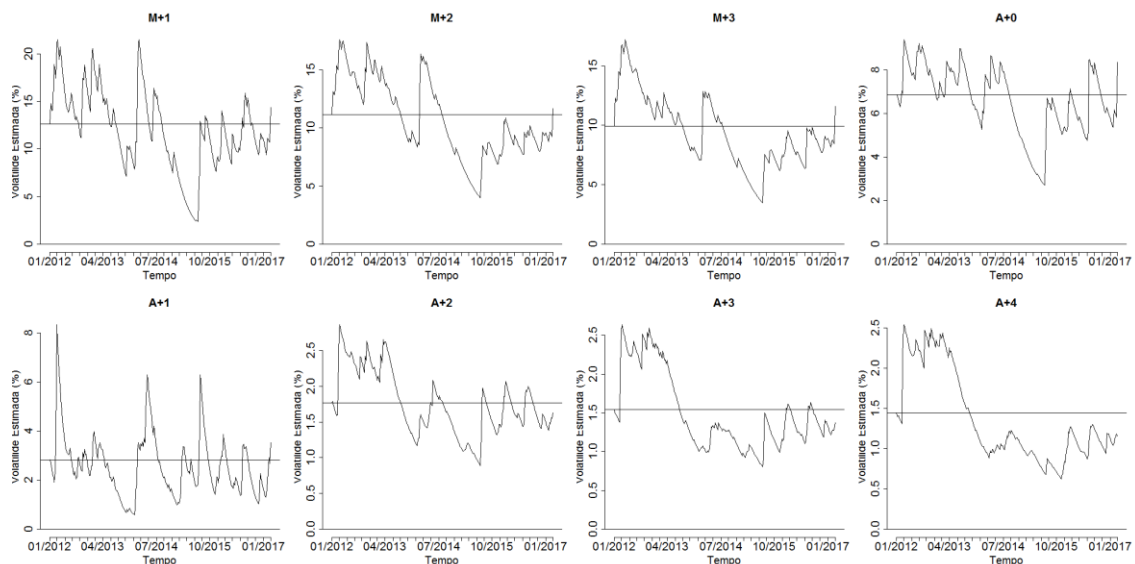


FIGURA 2 – Volatilidade Estimada pelo modelo de suavização exponencial para os produtos com maturidade M+1, M+2, M+3, A+0, A+1, A+2, A+3, A+4 com parâmetro igual a 0,95

Outra característica dos preços Forward de energia é que eles têm correlação de maneira a formarem blocos de curto e médio prazos e de longo prazos, podendo esses blocos interagirem em alguns momentos.

A estimação da matriz de correlações não condicional e para as semana s12/2017, s12/2016 e s12/2015 das variações dos produtos Forward padronizados pela volatilidade estimada são mostrados na figura 3.

Note que a correlação não condicional mostra os grupos de curto e médio prazos e o de longo prazo, onde produtos de até 3 meses de suprimento tem elevadas correlações entre eles, assim como produtos nas maturidades A+1 até A+4 que tem elevada correlação positiva entre si. Isso significa que quando um produto de curto prazo varia positivamente, tende a ser observado um movimento na mesma direção para os outros produtos do mesmo bloco. Um comportamento similar pode ser observado para os produtos de longo prazo. Importante notar que as correlações variam significativamente no tempo.

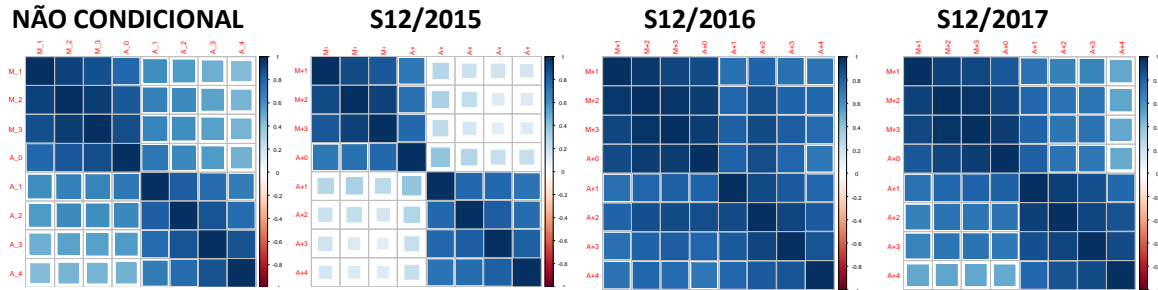


FIGURA 3 – Matrizes de correlação entre produtos de energia estimadas em datas específicas, exceto a primeira da esquerda que é a matriz de correlação não condicional.

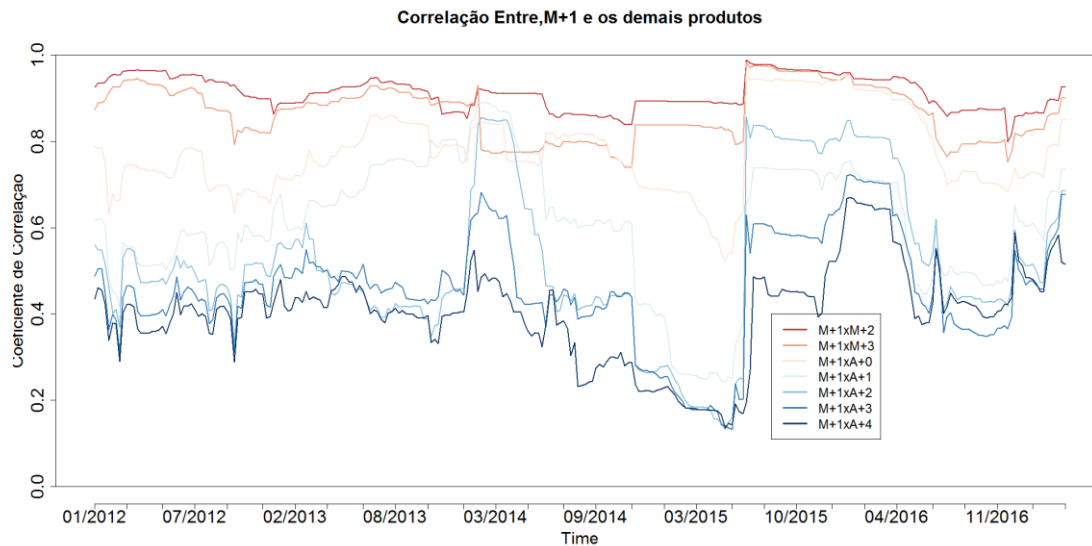


FIGURA 4 – Correlações estimadas pelo modelo de suavização exponencial entre os produtos M+1 e todos os demais com parâmetro igual a 0,95

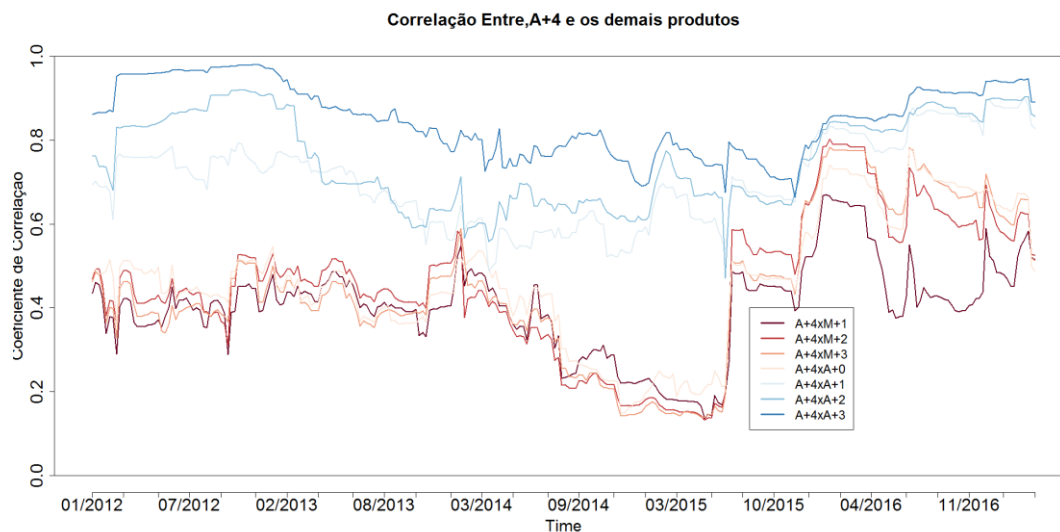


FIGURA 5 – Correlações estimadas pelo modelo de suavização exponencial entre os produtos A+4 e todos os demais com parâmetro igual a 0,95

A estrutura de variâncias e covariâncias estimada foi capaz de capturar a dinâmica dos preços de mercado, dado que os resíduos padronizados da modelagem tiveram estrutura similar a um ruído branco.

As funções densidades de probabilidade marginais dos resíduos estimada via Kernel gaussiano é apresentado na figura 6. Estas distribuições marginais servirão como base para simulação e estimação de métricas de risco.

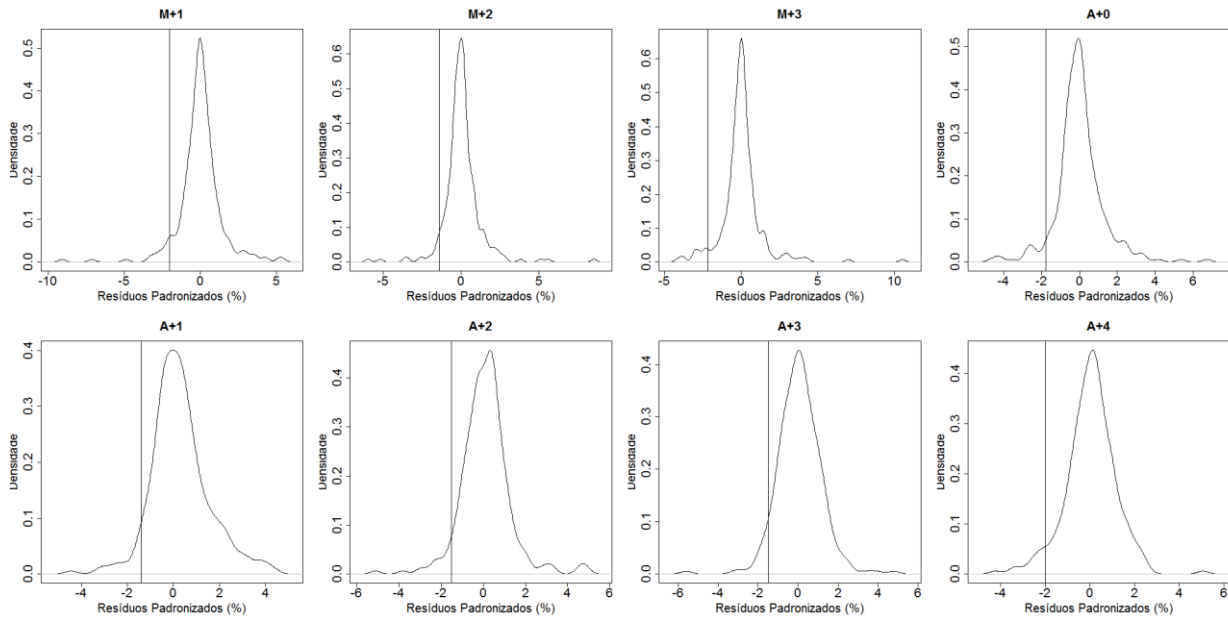


FIGURA 6 – Densidade Kernel estimada para os resíduos padronizados.

Para ilustrar o efeito desta modelagem na medição do risco de carteiras de energia elétrica iremos utilizar três posições de energia distintas como apresentado na tabela 2.

Tabela 2: Posições de energia para aplicação da metodologia

Posição (MWm)	M+1 (Abr/17)	M+2 (Mai/17)	M+3 (Jun/17)	A+0 (Jul-Dez/17)	A+1 2018	A+2 2019	A+3 2020	A+4 2021
Posição 1	5	5	5	5	5	5	5	5
Posição 2	5	5	5	5	5	-5	-5	-5
Posição 3	1	-2	-3	5	10	10	15	15

Para demonstrar como estes modelos poderiam ser aplicados à gestão de risco estimou-se o modelo descrito na seção de metodologia e simulou-se as distribuições marginais dos preços apresentadas na figura 6. Aplicando-se a matriz de variância e covariância estimada usando a abordagem Risk Metrics, que possui também uma volatilidade estimada para o último período, chegou-se às simulações das trajetórias das variações das curvas Forward para cada maturidade.

Partindo do cenário de preços da semana s12/2017, referente a penúltima semana de março (20/3/2017), temos a seguinte curva Forward

Tabela 3: Cenário de Curva Forward utilizado nas aplicações

Preços (R\$/MWh)	M+1 (Abr/17)	M+2 (Mai/17)	M+3 (Jun/17)	A+0 (Jul-Dez/17)	A+1 2018	A+2 2019	A+3 2020	A+4 2021
	237,33	275,91	272,18	237,26	180,59	162,77	157,63	154,55

Aplicando as variações simuladas aos preços da Tabela 2 calculamos as distribuições de probabilidade dos resultados financeiros para cada uma das posições de energia. Para questões de facilidade de interpretação os resultados foram divididos pelo valor absoluto da quantidade de energia do período e os resultados se referem a distribuição da marcação ao mercado da carteira de energia, ou seja, descontado do valor associado com a curva de preços da tabela 3.

Para questões de comparação são apresentados para cada cenário duas simulações de preços, a sem considerar o efeito das correlações (linha azul) e a que considera o efeito das correlações dinâmicas (linha preta).



Note que apenas no segundo caso, onde existem posições positivas e negativas na carteira as funções densidades são similares. Nos outros dois casos existe uma subestimação do risco em função da não consideração das correlações.

No último caso, mesmo com posições positivas e negativas de curto prazo, o modelo sem correlações não foi capaz de recuperar trajetórias típicas onde os preços ou todos sobem ou todos caem, gerando a subestimação do risco e também dos ganhos nas caudas das distribuições de probabilidade

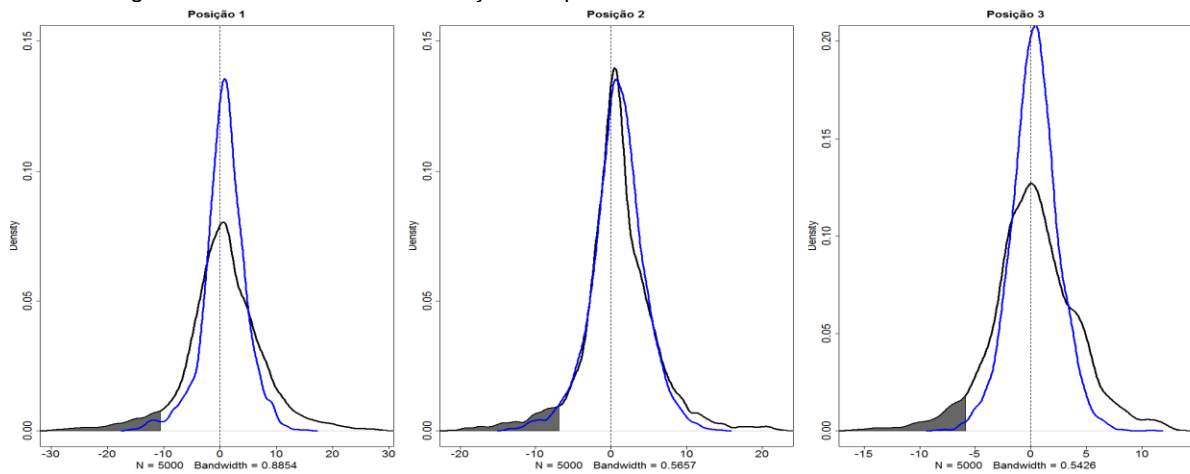


FIGURA 7 – Densidade Kernel das simulações da MtM dos resultados financeiros em R\$/MWh utilizando a metodologia Risk Metrics (linha preta) e desconsiderando correlações (linha azul), com o V@R 95% (cinza).

## 5.0 - CONCLUSÃO

O trabalho apresentou as características dos preços Forward de energia elétrica e discutiu uma forma de modelagem que incorpora as principais características empíricas das séries que são volatilidade e correlação variando no tempo.

Essa estrutura é flexível e de fácil implementação e pode ser utilizada pelas empresas para gerenciar carteiras de energia com posições em múltiplos períodos, já que considera o efeito de interação entre os produtos incorporados através da matriz de variância e covariância e também de efeitos de caudas pesadas refletidas na densidade Kernel.

Como visto nas aplicações, a premissa de correlação tem um efeito crítico na estimação das métricas de risco, de forma que a sua não consideração tende a subestimar o valor em risco de carteiras típicas de energia.

## 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LEME, H.; HANSEN, P. M. ; HOTTA, L. K. ; ZEVALLOS, M. . Curva Forward no mercado de energia elétrica brasileiro: construção, modelagem, previsão e simulação. In: VIII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2012, Curitiba. Anais, 2012.
- (2) WEI, W. W. S.: Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods. 2a ed., Pearson Education, New York, Estados Unidos, 2006.
- (3) ANDERSEN, T.G., BOLLERSLEV, T., CHRISTOFFERSEN, P.F., AND DIEBOLD, F.X. Volatility and Correlation Forecasting, Handbook of Economic Forecasting. Amsterdam: North-Holland, 2006

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Henrique Leme Felizatti, Leme 1983, Campinas –Unicamp – É estatístico e mestre em estatística e sua experiência inclui o grupo CPFL Energia, a Universidade Estadual de Goiás. Atualmente é sócio-fundador e diretor da Dcide e professor de estatística empresarial na Unicamp.

Patricio Martin Hansen, Rosario/Argentina 1971, Buenos Aires – Universidad de Buenos Aires – É economista e sua experiência inclui Lloyds Bank, Buenos Aires Stock Exchange, Enron e CPFL Energia. É sócio-fundador da Dcide onde atua como diretor geral até o momento.

Suas áreas de pesquisa incluem gestão, controle e melhores práticas de risco de mercado, teoria de derivativos, preços de energia e séries temporais e econometria.