

EXPANSÃO DA GERAÇÃO

Método de cálculo dos preços de referência de combustíveis para os leilões de energia

Julho de 2021



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Bento Albuquerque

Secretário-Executivo do MME

Marisete Fátima Dadald Pereira

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Paulo Cesar Magalhães Domingues

Secretário de Energia Elétrica

Christiano Vieira da Silva

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

José Mauro Ferreira Coelho

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Alexandre Vidigal de Oliveira



Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Erik Eduardo Rego

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Angela Regina Livino de Carvalho

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

Esplanada dos Ministérios Bloco "U" Sala 744 - Brasília - DF BRASIL

CEP: 70.065-900

Escritório Central

Av. Rio Branco, 01 – 11º Andar
20090-003 - Rio de Janeiro – RJ

EXPANSÃO DA GERAÇÃO

Método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis para os leilões de energia

Coordenação Geral

Erik Eduardo Rego

Heloisa Borges Bastos Esteves

Coordenação Executiva

Bernardo Folly de Aguiar

Thiago Ivanoski Teixeira

Marcelo Ferreira Alfradique

Equipe Técnica

Caio Monteiro Leocadio

Gabriel de Figueiredo da Costa

Guilherme Mazolli Fialho

Gustavo Pires da Ponte

Jorge Gonçalves Bezerra Júnior

Pedro Americo Moretz-Sohn David

Nº. EPE-DEE/DPG-001/2021-r1

Data: 15 de julho de 2021

IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO E REVISÕES

		
<i>Área de Estudo</i> Expansão da Geração		
<i>Estudo</i> Leilões de Energia		
<i>Macro atividade</i> Método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis para os leilões de energia		
<i>Ref. Interna (se aplicável)</i>		
<i>Revisões</i>	<i>Data de emissão</i>	<i>Descrição sucinta</i>
r0	29/06/2021	Emissão original
r1	15/07/2021	Inclusão do Item 1.3

Apresentação

De acordo com o Art. 5º, §1º, da Portaria MME nº46/2007, fica atribuído à EPE a indicação do método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis marcados a preços internacionais, por meio de Nota Técnica. Estes preços visam a trazer, em última análise, expectativas dos custos com combustíveis que os consumidores de eletricidade arcarão com as termelétricas que se sagrarem vencedoras de leilões de energia do ambiente regulado. Tais expectativas são refletidas na competitividade dos empreendimentos nos leilões de energia, por meio de cálculo de parâmetros que deverão compor o Índice Custo-Benefício de cada empreendimento, quais sejam: garantia física, receita fixa associada aos combustíveis, custo de operação e custo econômico de curto prazo para cada um dos empreendimentos.

A primeira versão da Nota Técnica contendo o método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis foi publicada no ano de 2009¹, num contexto energético bastante distinto do atual. Naquela época, havia contratações recorrentes de usinas termelétricas a combustíveis fósseis de elevada emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE) para atendimento ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Diante de um mercado global de gás natural ainda em desenvolvimento, os CCEARs para termelétricas a gás permitiam pagamento por custos com combustível mediante indexação apenas aos marcadores *Henry Hub* ou *Brent*, sendo a opção entre eles mutuamente exclusiva.

Com o desenvolvimento do mercado de GNL, novas soluções integradas de geração de energia adquiriram competitividade nos leilões, com especial destaque aos projetos de usinas termelétricas localizadas na costa brasileira, próximas a terminais flutuantes de armazenamento e regaseificação de GNL. Marcadores de preços internacionais de gás e GNL adquiriram maior relevância, a exemplo do *Japan-Korea Marker* (JKM), o que contribuiu para aprimoramentos nos CCEARs a partir do ano de 2016. Deste período em diante, os agentes geradores passaram a ter a opção de indexar os custos com combustível a quatro marcadores de preços internacionais: além do *Henry Hub* e do *Brent*, existe a opção pelo NBP – *National Balancing Point* – e pelo JKM, sendo que os agentes podem escolher livremente sua cesta de indexadores². Outro aprimoramento importante neste período foi a adoção da opção por fórmulas distintas de reajustes entre os custos variáveis (CVU) e os custos fixos (RFComb) com combustível, a critério dos geradores, para fins de pagamento dos custos com combustível das parcelas despachável e inflexível nos CCEARs, respectivamente.

Esta mudança culminou na necessidade de revisão da Nota Técnica dos preços de referência no ano de 2015. Um ponto de atenção foi identificado em relação ao JKM: não existe publicação da expectativa de preços de longo prazo para este marcador disponível abertamente. Esta característica exige um tratamento específico dado ao JKM em relação aos demais marcadores, cujas previsões de preços são disponibilizadas para livre acesso pelas instituições EIA – *Energy Information Administration*, do Governo dos Estados Unidos da América, e pelo BEIS – *Department*

¹ Nota Técnica Nº EPE-DEE/DPG-RE-001/2009, *Projeção dos Preços dos Combustíveis para Determinação do CVU das Termelétricas para Cálculo da Garantia Física e dos Custos Variáveis da Geração Termelétrica (COP e CEC)*. Publicação original em 07/04/2009. Última versão em 04/09/2015.

² A cesta de indexadores pode ser composta por uma combinação entre os marcadores de preços, com as proporções definidas pelos agentes de geração, em conformidade com a Portaria MME nº 42/2007.

for Business, Energy & Industrial Strategy, do Governo do Reino Unido. Assim, com o objetivo de se manter a publicidade das informações adotadas no método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis, optou-se por realizar a projeção do JKM a partir das publicações abertas do Banco Mundial de previsões de preços para o GNL no Japão, ajustadas à base do JKM por meio de correlações de preços históricos.

Entretanto, nos últimos anos, verifica-se que os valores de preços de referência dos combustíveis têm apontado para expectativas de preços otimistas do JKM em comparação aos demais marcadores de preços. Isto tem impactado a tomada de decisão dos agentes geradores, cujas preferências têm se revelado pela escolha majoritária de vinculação dos custos com combustíveis ao JKM e ao dólar americano. Tal diagnóstico dá indícios de um desequilíbrio na competição entre os preços internacionais e de falta de valorização da indexação de custos com combustível à moeda nacional, que poderia favorecer tanto os consumidores de eletricidade, pela previsibilidade de preços ao longo do tempo, quanto aos produtores de gás de origem nacional, por terem sua estrutura de custos correlacionada à moeda brasileira.

Outra mudança importante que ocorre nos CCEARs para a contratação da geração termelétrica a gás natural a partir dos leilões de geração de 2021 reside na eliminação do limite de inflexibilidade operacional declarada pelos empreendedores. Esta medida visa a permitir modelos de negócio de geração elétrica alinhados aos níveis de inflexibilidade da produção de gás de origem nacional, especialmente o gás associado. Dada a existência de ampla oferta potencial de gás associado em campos marítimos, e sendo o setor elétrico o segundo maior consumidor do gás natural no país, entende-se que pode haver uma relação sinérgica entre o desenvolvimento do setor de gás e a ampliação da competitividade na geração elétrica.

Estas recentes mudanças nas contratações de termelétricas a gás natural, e os resultados históricos dos preços de referência, sugerem uma revisão do método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis com dois objetivos: (i) aprimorar a robustez do método para dar maior confiabilidade aos preços de referência, especialmente do JKM; e (ii) incluir o atributo de volatilidade, de modo a se refletir na competição, não somente a preferência do consumidor pelos menores preços, mas também pelos preços com maior previsibilidade.

Com as medidas de aprimoramento propostas nesta Nota Técnica, espera-se maior adequabilidade das projeções de futuro para os diferentes marcadores de preços internacionais, precificação de risco de volatilidade e aumento da competitividade de soluções de suprimento a gás de origem nacional.

Índice

1	Introdução	2
1.1	<i>Volatilidade dos Preços Internacionais para o Gás Natural</i>	3
1.2	<i>Preços de Referência para o Gás Natural nos Leilões de Energia</i>	5
1.3	<i>Sobre a aplicação da metodologia</i>	8
2	Novo Método de Cálculo dos Preços de Referência dos Combustíveis	8
3	Validação do Método	12
3.1	<i>Hipótese 1</i>	13
3.2	<i>Hipóteses 2, 3 e 5</i>	15
3.3	<i>Hipótese 4</i>	19
4	Resultados	21
4.1	<i>Valores para $\alpha 1$ e $\alpha 2$</i>	21
4.2	<i>Análise Comparativa de Resultados Históricos</i>	24
4.3	<i>Preços de Referência para o Leilão de Energia Nova A-5/2021</i>	26
5	Considerações Finais	27

1 Introdução

O valor da Garantia Física (GF), o valor esperado do Custo de Operação (COP) e do Custo Econômico de Curto Prazo (CEC) da geração termelétrica são parâmetros fundamentais de avaliação do valor energético e da competitividade (relação custo – benefício) de uma termelétrica para sua inserção no plano de expansão da geração do Sistema Interligado Nacional - SIN e contratação. Todos estes valores (GF, COP e CEC) dependem da frequência do despacho da geração termelétrica, que, por sua vez, decorre da relação entre o Custo Variável Unitário (CVU) de geração da termelétrica e do Custo Marginal de Operação do sistema (CMO):

- Se $CVU \leq CMO \rightarrow$ A termelétrica é despachada por mérito econômico;
- Se $CVU > CMO \rightarrow$ A termelétrica não é despachada acima da sua inflexibilidade operativa³.

Assim, o cálculo dos parâmetros energéticos (GF) e econômicos (COP e CEC) da geração termelétrica requer a projeção dos valores futuros do respectivo CVU. O CVU é composto de duas parcelas: a do Custo do Combustível (C_{comb}) destinado à geração de energia flexível, e a que apropria os demais custos incorridos na geração flexível ($C_{O\&M}$):

$$CVU = C_{comb} + C_{O\&M} \quad (1)$$

O custo do combustível para empreendimentos que utilizem fonte energética atrelada a reajustes distintos do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) é expresso pela seguinte relação, descrita no art. 5º, §1º da Portaria MME nº 46/2007:

$$C_{comb} = i \cdot P_C \cdot e_0 \quad (2)$$

Sendo:

- i : fator de Conversão, informado pelo agente, que constará no CCEAR, permanecendo invariável por toda a vigência do contrato. Tem a função de converter o preço do combustível – dimensionado em unidade monetária por unidade de energia – em custo de geração elétrica associado ao combustível – dimensionado em unidade monetária por unidade de energia elétrica. A unidade dimensional do fator i é definida pela razão entre unidade de energia térmica do combustível por unidade de energia elétrica de geração;

³ Existe a possibilidade de ocorrência de despachos fora da ordem de mérito, além da inflexibilidade operativa, a exemplo dos despachos por restrições elétricas ou por segurança energética.

- P_C : expectativa de preço futuro dos combustíveis referenciados no § 1º do art. 5º da Portaria MME nº 46, de 9 de março de 2007, expressa em unidade monetária do dólar americano por unidade energética;
- e_0 : taxa média de câmbio do dólar americano, em R\$/US\$.

A expectativa dos preços futuros também é considerada na composição da receita fixa associada aos custos com combustível (RF_{comb}), no ato do leilão:

$$RF_{comb} = E \cdot i \cdot P_C' \cdot e_0 \quad (3)$$

Sendo,

- E : energia associada à geração inflexível anual, expressa em MWh/ano;
- P_C' : expectativa dos preços futuros dos combustíveis, com valores não necessariamente vinculados a P_C , da equação (2), a critério do agente gerador, conforme a cesta de preços escolhida para cada uma das parcelas de custos, fixos ou variáveis.

Atualmente, o termo P_C é estabelecido pela Portaria MME nº 42/2007 da seguinte forma:

$$P_C = a \cdot HH + b \cdot Brent + c \cdot NBP + d \cdot JKM + e + \frac{f}{e_0} \quad (4)$$

Os parâmetros a , b , c , d possibilitam a indexação dos custos com combustível à cesta de preços internacionais disponível. No caso das termelétricas a gás natural, esta cesta de preços é a seguinte: *Henry Hub* (HH), *Brent*, *NBP* e *JKM*. Os reajustes dos preços internacionais ocorrem em base mensal. Os parâmetros e e f correspondem a indexações a moeda norte americana e a moeda nacional, respectivamente. Estes reajustes ocorrem em base anual, pelos índices de inflação oficiais aos consumidores urbanos em cada um dos países.

Atualmente, os CCEARs de geração termelétrica alocam os riscos de preços dos combustíveis aos consumidores de eletricidade. A percepção de risco deve considerar que os CCEARs para novos empreendimentos são de longo prazo e não há previsão de repactuação de cláusulas econômicas durante a vigência dos contratos. Daí a importância dos preços de referência, à medida em que visam a trazer para a etapa de competição nos leilões a expectativa futura de cada um dos marcadores internacionais acima apresentados e incentivar economicamente a indexação aos preços de combustíveis mais competitivos para o futuro.

1.1 Volatilidade dos Preços Internacionais para o Gás Natural

Conforme mencionado anteriormente, pelo desenho atual dos CCEARs de geração termelétrica, a volatilidade dos preços internacionais de gás natural e da taxa de câmbio do dólar americano são riscos alocados diretamente aos consumidores de energia. No caso da geração flexível, este risco tende a ser

gerenciável pela dinâmica da ordem de mérito econômico de despacho. Caso os reajustes de preços impliquem em aumento relativamente elevado do CVU de algumas termelétricas, é possível que elas se tornem menos propensas ao despacho por ordem de mérito em relação a usinas mais econômicas, e vice-versa. Entretanto, no caso da geração inflexível, a produção elétrica é compulsória e os custos com combustível devem ser necessariamente pagos pelos consumidores, independentemente dos preços internacionais e da taxa de câmbio.

A volatilidade historicamente percebida pelos consumidores de energia é estimada a seguir. Primeiramente, avaliou-se o comportamento histórico dos preços médios mensais do *Henry Hub*, *Brent*, *NBP* e *JKM*, desde janeiro de 2010 até fevereiro de 2021, em base nominal, conforme Figura 1. Os valores são proporcionais ao preço médio do *Henry Hub* em janeiro de 2010, que foi assumido como o valor-base para a comparação, sendo igual a 100. Adotou-se a base de dados da *Platts* para os preços históricos, a mesma base foi utilizada para fins de reajustes dos CCEARs.

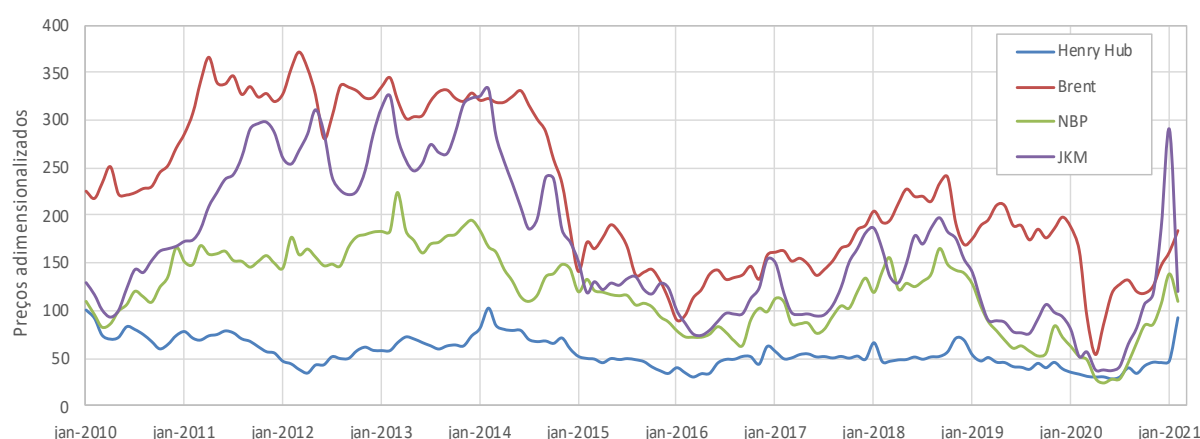


Figura 1 – Histórico dos preços de combustíveis, de janeiro de 2010 a fevereiro de 2021. (Valores proporcionais ao preço médio do *Henry Hub* em janeiro de 2010, definido como 100).

Com base no histórico de preços, avaliou-se como teria sido o comportamento dos CVUs de algumas usinas termelétricas a gás natural vencedoras dos mais recentes leilões de energia nova (entre 2015 e 2019), considerando as fórmulas de reajuste presentes nos contratos celebrados e os preços dos combustíveis realizados desde janeiro de 2010 a fevereiro de 2021. Os resultados⁴ são apresentados na Figura 2.

⁴ Cabe esclarecer que este exercício é hipotético e visa a trazer uma percepção de possível exposição do setor elétrico (no que diz respeito à geração a gás natural) aos preços internacionais.

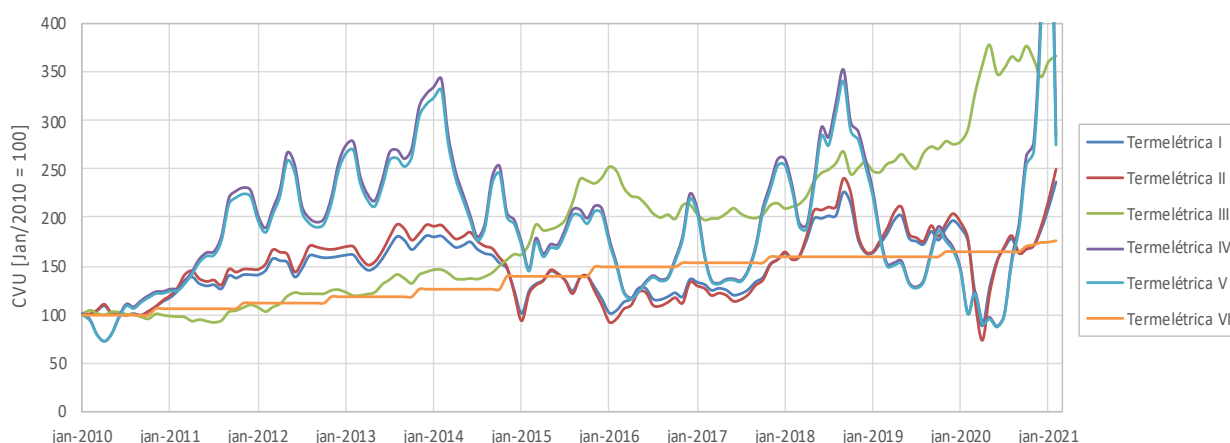


Figura 2 – Variação hipotética dos CVUs das termelétricas a gás natural vencedoras dos leilões de energia nova desde 2015 até 2019 no horizonte temporal de janeiro de 2010 a fevereiro de 2021.

Pela Figura 2 é possível verificar níveis de variação de CVU bastante distintos entre as usinas. A Termelétrica VI, com CVU indexado a IPCA, apresenta maior previsibilidade de custos variáveis entre as usinas analisadas. As Termelétricas I e II, ambas com CVUs atrelados ao *Brent*, apresentam oscilações em torno de uma média similar à obtida pelo IPCA. A termelétrica III, com forte indexação ao dólar, apresenta CVU crescente com o tempo, com valoração de quase 400% ao final do horizonte. Por fim, as Termelétricas IV e V, indexadas ao JKM, apresentam os maiores níveis de volatilidade: em janeiro de 2021 os CVUs destas duas usinas teriam tido um valor maior que 650% em relação a janeiro de 2010.

Estes resultados apontam para o fato de que, além do preço médio futuro dos combustíveis ser um critério importante para a seleção das usinas nos leilões de energia, a volatilidade dos preços também deve ser levada em consideração, pois insere riscos financeiros elevados aos consumidores, a depender da indexação dos CVUs nos CCEARs. Pelos resultados, evidencia-se que, dentre os possíveis, o JKM é o marcador com maior impacto na volatilidade dos CVUs analisados.

1.2 Preços de Referência para o Gás Natural nos Leilões de Energia

A competitividade relativa entre os preços de referência dos combustíveis nos leilões de energia é avaliada a seguir, a partir de dados históricos de preços aos leilões de energia. Foram considerados os valores estabelecidos para o LEN A-5/2014, LEN A-3 e A-5/2015, LEN A-5/2016, LEN A-6/2017, LEN A-6/2018, LEN A-6/2019, LEE A-4 e A-5/2020, e LEE A-4 e A-5/2021, apresentados na Figura 3. Cabe destacar que os marcadores NBP e JKM passaram a fazer parte das opções nos CCEARs somente a partir de 2016.

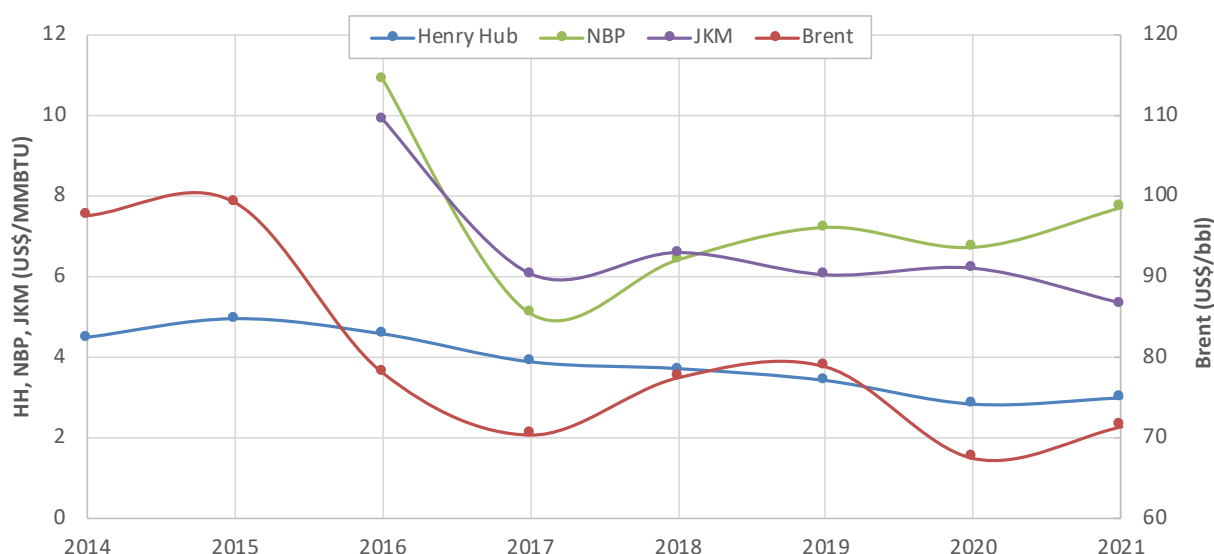


Figura 3 – Preços de referência de combustíveis para leilões de energia, desde 2014 até 2021.

Verifica-se pela Figura 3 a queda dos preços de referência ao longo dos últimos anos para todos os marcadores, com leve recuperação no último ano apenas para o NBP. Nesta dinâmica, os preços do JKM têm se tornado cada vez mais competitivos frente aos demais. Embora o valor do JKM seja superior ao *Henry Hub*, é importante lembrar que se trata de um marcador de preços de GNL no mercado asiático, enquanto o *Henry Hub* é o preço do gás natural comercializado em *hub* específico nos EUA. Portanto, para fins de comparação direta de preços, deve-se adicionar ao preço do *Henry Hub* um prêmio sobre o marcador, que costuma ser entre 10% e 20%, o custo de liquefação e frete. Estima-se que estes custos adicionais insiram um aumento entre US\$ 3,0 /MMBTU e US\$ 5,0 /MMBTU para o GNL atrelado ao *Henry Hub*, de acordo com informações recentes de mercado. Com isto, os custos de GNL para este marcador seriam superiores a US\$ 6,5 /MMBTU em 2021, valor pelo menos 20% superior ao JKM, cuja média foi de US\$ 5,33 /MMBTU em 2021.

A competitividade relativa entre os preços tem influenciado diretamente a tomada de decisão dos agentes participantes dos leilões de energia em relação à indexação dos custos com combustível. A Figura 4 e a Figura 5 apresentam as escolhas dos marcadores de preços nos CCEARs pelos agentes participantes de leilões entre os anos de 2016 e 2021, para CVU e RFComb, respectivamente.

No caso, o JKM tem sido a opção principal para indexações do CVU e a segunda maior escolha para o RFComb. O dólar americano tem sido a segunda escolha para o CVU e a primeira para RFComb. Estas características indicam que os marcadores mais competitivos para os leilões são aqueles que teriam apresentado os maiores níveis de volatilidade ao longo da última década. Tendo em vista que o papel dos preços de referência é de contribuir para a sinalização econômica dos custos e benefícios de cada empreendimento termelétrico aos consumidores de energia, à medida em que eles não refletem a volatilidade inerente a cada preço internacional, deixam de apresentar uma sinalização adequada em termos de competitividade para benefício do consumidor. Isto porque os riscos financeiros aos consumidores, decorrentes da volatilidade dos preços, ficam omitidos. Este contexto motiva a revisão do método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis, cuja proposta é apresentada a seguir.

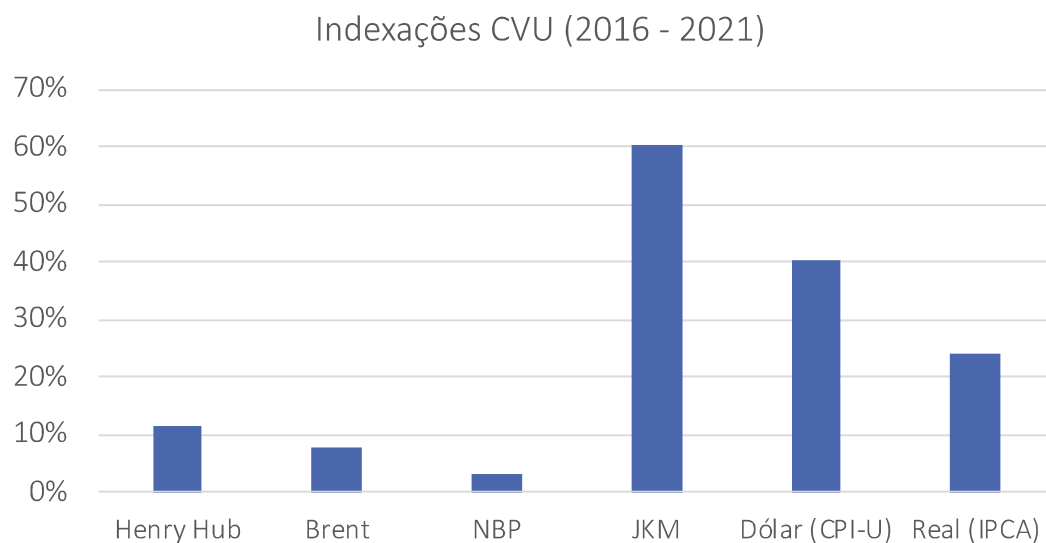


Figura 4 – Parâmetros de indexação para reajuste de CVU nos leilões de energia entre 2016 e 2021 escolhidos pelos agentes geradores.

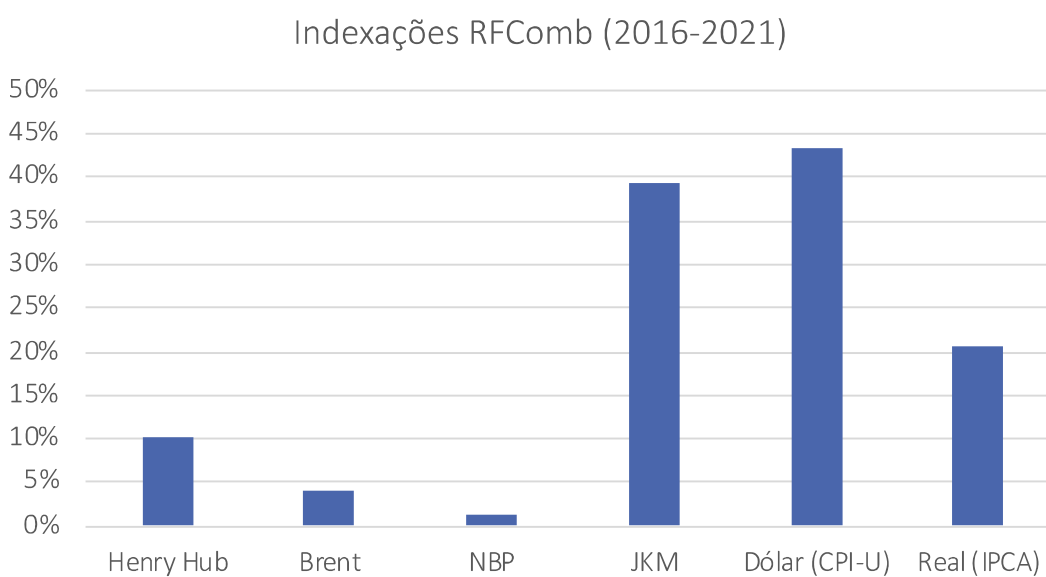


Figura 5 – Parâmetros de indexação para reajuste de RFComb nos leilões de energia entre 2016 e 2021 escolhidos pelos agentes geradores.

1.3 Sobre a aplicação da metodologia

Esta metodologia aplica-se aos leilões de que tratam os arts. 2º e 3º da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, em linha com diretrizes do Ministério de Minas e Energia.

Todavia, no que se refere às contratações de geração termelétrica previstas no § 1º do art. 1º da Lei nº 14.182 de 12 de julho de 2021, em razão de tratamento específico previsto nesse comando legal, particularmente para atualização/correção do preço-teto para geração a gás natural do Leilão A-6 de 2019, a metodologia a ser adotada estará vinculada ao disposto na referida lei e eventuais regulamentos e normativos que venham a ser estabelecidos.

2 Novo Método de Cálculo dos Preços de Referência dos Combustíveis

Com base no exposto, e buscando aprimorar as métricas utilizadas na avaliação dos preços de referência, além de mitigar a alta volatilidade que poderia haver no uso de marcadores com alta variação, o método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis proposto no presente trabalho considera a seguinte formulação:

$$P_{ref} = E\{P_{F,\alpha_1}\} \cdot \beta_{\alpha_2} \quad (5)$$

Onde:

- P_{ref} : é valor do preço de referência de cada um dos marcadores de preços internacionais;
- $E\{P_F\}$: é a média dos preços futuros do marcador, incluindo o ano de realização do leilão;
- β : é a correlação histórica entre a base *Platts* (adotada para fins de reajustes nos CCEARs) e a base pública correspondente, a ser detalhado a seguir;
- α_1 : representa o nível de aversão ao risco em relação à volatilidade dos preços futuros;
- α_2 : representa o nível de aversão ao risco em relação à correlação β .

Conforme apresentado na Nota Técnica Nº EPE-DEE/DPG-RE-001/2009-r2, os critérios para a escolha das fontes das bases de preços futuros, a serem adotados na Equação (5), são: transparência, publicidade e imparcialidade. Sob estes quesitos, a EPE tem adotado as seguintes instituições, para cada um dos marcadores:

- *Henry Hub: Annual Energy Outlook*, do EIA;
- *Brent: Annual Energy Outlook*, do EIA;

- NBP: *Fossil Fuel Price Assumptions*, do Governo do Reino Unido;
- JKM: *Commodity Markets Outlook*, do Banco Mundial⁵.

A expectativa dos preços futuros é apresentada nos relatórios supracitados com discretização anual. Deste modo, o valor da média dos preços futuros é dado pela seguinte relação:

$$E\{P_F\} = \frac{\sum_{i=1}^N P_F(i)}{N} \quad (6)$$

Onde $P_F(i)$ é o preço médio futuro anual estabelecido pela instituição com base pública para cada ano i , considerando um horizonte de N anos à frente, sendo:

- $N = 10$ anos, no caso dos preços de referência para o cálculo do CVU estrutural a ser utilizado no cálculo da Garantia Física e do COP e CEC referente à contratação por disponibilidade, por mais de 10 anos de duração;
- $N = 5$ anos, no caso dos preços de referência para o cálculo do CVU a ser utilizado no cálculo de COP e CEC referente à contratação por disponibilidade, com até 10 anos de duração.

Já o valor de β é obtido pela correlação de preços históricos médios mensais de cada um dos marcadores na base *Platts* em relação às bases públicas mencionadas acima, assumindo-se um histórico de 120 meses, que se encerra no mês de dezembro do ano anterior ao da realização do leilão. A teoria que fundamenta a correlação histórica para β assume por hipótese que os preços históricos médios mensais da *Platts*⁶ podem ser representados por uma correlação linear utilizando os preços das instituições de base pública, com coeficiente linear nulo (hipótese 1), conforme segue:

$$P_{Platts}(j) = \beta \cdot P_H(j) + \varepsilon(j) \quad (7)$$

Onde

- P_{Platts} : é o preço histórico médio mensal do marcador na base *Platts* (variável dependente);

⁵ A opção por diferentes instituições entre os marcadores de preços decorre de que nenhuma delas apresenta publicações para todos eles. Especificamente para o caso do JKM cabe a ressalva de que não se encontra disponível publicamente previsões de preços para este marcador. De fato, expectativa de preços futuros fornecida pelo Banco Mundial corresponde ao GNL na Japão, e não ao JKM. Sendo assim, as previsões para o JKM são obtidas indiretamente por meio de projeções de preços do GNL do Japão, cujo resultado é trazido para a base do JKM por meio de correlação histórica entre ambos os marcadores.

⁶ A base de dados da *Platts* é utilizada nos reajustes dos custos com combustíveis para termelétricas nos CCEARs, conforme Portaria MME nº 42/2007. Por este motivo, adota-se esta base como referência no desenvolvimento deste método.

- P_H : é o preço histórico médio mensal do marcador na base pública, a mesma adotada para os preços futuros (variável independente);
- β : é o coeficiente angular da relação entre os preços;
- ε : é o desvio aleatório entre os preços da base *Platts* e a correlação linear da base pública;
- j : é um contador para os meses históricos.

O termo β é obtido por meio de regressão linear dos dados históricos da base pública e da base *Platts*, pelo método dos mínimos quadrados, cuja equação é conforme a seguir:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^{120} [P_{Platts}(j) \cdot P_H(j)]}{\sum_{j=1}^{120} [P_H(j)]^2} \quad (8)$$

O desvio padrão amostral de β é:

$$\hat{\sigma}_\beta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{120} \varepsilon(j)^2}{119 \cdot \sum_{j=1}^{120} [P_H(j)]^2}} \quad (9)$$

Assumindo-se como premissa que os desvios aleatórios $\varepsilon(j)$ apresentam a distribuição de frequências aderente à normal, então a correlação histórica com uma aversão ao risco α_2 pode ser descrita da seguinte forma:

$$\beta_{\alpha_2} = \beta + Z_{\alpha_2} \cdot \hat{\sigma}_\beta \quad (10)$$

Sendo Z_{α_2} a variável aleatória normal padronizada específica para o nível de aversão ao risco α_2 .

Para a definição do método de cálculo da volatilidade, adota-se um postulado da economia que estabelece que a variação dos preços de algumas commodities ao longo do tempo segue uma distribuição log-normal. Mais especificamente, a distribuição de frequências da relação " $\ln(P(k+t)) - \ln(P(k))$ " é aderente à distribuição normal. Onde t é um incremento temporal e $P(k)$ é o preço da commodity num determinado momento k .

Assumindo-se que este postulado é aplicável aos marcadores de preços internacionais *Henry Hub*, *Brent*, *NBP* e *JKM* da base *Platts* (hipótese 2), admite-se que a média da distribuição de frequência tende a zero (hipótese 3), ou seja:

$$E\{\ln(P(k+t)) - \ln(P(k))\} = E\left\{\ln\left(\frac{P(k+t)}{P(k)}\right)\right\} = 0 \quad (11)$$

Este resultado sugere que a esperança matemática dos preços tende à média, conforme a seguir:

$$E\left\{\frac{P(k+t)}{P(k)}\right\} = 1$$

$$E\{P(k)\} = E\{P(k+t)\} \quad (12)$$

Admitindo-se ainda que a variância dos dados é estável ao longo do período avaliado (hipótese 4), então a expectativa dos preços futuros tende a uma média e a incerteza dos preços futuros pode ser avaliada com base na volatilidade dos preços históricos.

Aplicado ao método aqui desenvolvido, admitindo-se dados de preços históricos médios mensais considerando um horizonte de 120 meses, até o mês de dezembro do ano anterior ao da realização do leilão, o preço médio futuro, com grau de aversão ao risco α_1 , pode ser descrito conforme desenvolvimento a seguir:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$$Z_{\alpha_1} = \frac{E\left\{\frac{\ln(P_{F,\alpha_1})}{\ln(P_F)}\right\} - \mu}{\hat{\sigma}_{P_F}}$$

$$E\{\ln(P_{F,\alpha_1})\} = E\{\ln(P_F)\} + \mu + Z_{\alpha_1} \cdot \hat{\sigma}_{P_F}$$

$$E\{P_{F,\alpha_1}\} = E\{P_F\} \cdot e^{(\mu + Z_{\alpha_1} \cdot \hat{\sigma}_{P_F})} \quad (13)$$

Sob a hipótese 2, de que a média μ tende a zero,

$$E\{P_{F,\alpha_1}\} = E\{P_F\} \cdot e^{(Z_{\alpha_1} \cdot \hat{\sigma}_{P_F})} \quad (14)$$

O desvio padrão amostral neste caso é calculado considerando-se preços médios históricos mensais de 120 meses, a encerrar-se no mês de dezembro do ano anterior ao da realização do leilão, da seguinte forma:

$$\hat{\sigma}_{P_F} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{119} \left[\ln\left(\frac{P(j+1)}{P(j)}\right) - \frac{1}{119} \cdot \sum_{j=1}^{119} \left(\ln\left(\frac{P(j+1)}{P(j)}\right) \right) \right]^2}{118}} \quad (15)$$

Portanto, o desvio padrão está relacionado à variabilidade de preços entre um determinado mês e o mês seguinte. Para se considerar a variabilidade para horizontes maiores que um mês, adota-se aqui a premissa de que os eventos são estatisticamente independentes (hipótese 5). Ou seja, a correlação entre preços em base logarítmica em diferentes meses tende a zero. Com isto, a variância entre preços médios

mensais distantes “n” meses entre si, é proporcional a “n” vezes a variância entre um mês e o seguinte, conforme a seguir:

$$\begin{aligned}\sigma_n^2 &= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2 \\ \sigma_n^2 &= n \cdot \sigma^2\end{aligned}\tag{16}$$

Logo, o desvio padrão para n meses à frente é:

$$\sigma_n = \sqrt{n} \cdot \sigma\tag{17}$$

Para um valor médio de um horizonte de 120 meses à frente, admite-se neste trabalho, por simplificação, o seguinte:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}^2 &= \frac{\sigma^2 + 2\sigma^2 + 3\sigma^2 + \dots + 120\sigma^2}{120} \\ \bar{\sigma} &= \sqrt{60,5} \cdot \sigma\end{aligned}\tag{18}$$

Assim, o valor particular para a equação (14) é:

$$E\{P_{F,\alpha_1}\} = E\{P_F\} \cdot e^{(Z_{\sqrt{60,5}} \cdot \hat{\sigma}_{P_F})}\tag{19}$$

Deste modo, a equação (5) fica da seguinte forma:

$$P_{ref} = E\{P_F\} \cdot e^{(Z_{\alpha_1} \sqrt{60,5} \cdot \hat{\sigma}_{P_F})} \cdot (\beta + Z_{\alpha_2} \cdot \hat{\sigma}_\beta)\tag{20}$$

A seguir, são avaliadas as hipóteses destacadas para o modelo.

3 Validação do Método

São destacadas no novo método de cálculo dos preços de referência 5 hipóteses para se obter a formulação final, conforme mencionado previamente no item 0. Nesta etapa do trabalho as hipóteses são testadas:

- Hipótese 1: os preços históricos médios mensais da *Platts* podem ser representados por correlação linear com os preços históricos das instituições de base pública, com coeficiente linear nulo;

- Hipótese 2: a distribuição de frequência da relação " $\ln(P(k+t)) - \ln(P(k))$ " pode ser representada por uma distribuição normal;
- Hipótese 3: a média da distribuição da população da relação " $\ln(P(k+t)) - \ln(P(k))$ " tende a zero;
- Hipótese 4: a variância dos dados da relação " $\ln(P(k+t)) - \ln(P(k))$ " é estável ao longo do período avaliado;
- Hipótese 5: os eventos relacionados à variação dos preços na base logarítmica são estatisticamente independentes, ou seja, a covariância dos dados tende a zero.

3.1 Hipótese 1

A hipótese 1 é testada com base em dados históricos da *Platts* e das correspondentes bases públicas, para cada um dos marcadores de preços. Como resultados, são apresentados a seguir, os valores obtidos de β (com base na equação (8)), os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios padrão correspondentes a β (com base na equação (9)).

No caso do *Henry Hub*, foi realizada uma regressão linear entre os preços médios mensais das bases *Platts* e EIA, considerando 285 dados, de janeiro de 1997 até setembro de 2020. Conforme se pode observar na Figura 6, a correlação linear entre os dados das instituições apresenta valor de β e coeficiente de determinação, ambos tendendo à unidade, enquanto o desvio padrão de β verificado para este período é de 2,5E-4. Estes dados demonstram a elevada capacidade explicativa desta regressão linear e baixíssima dispersão entre os dados.

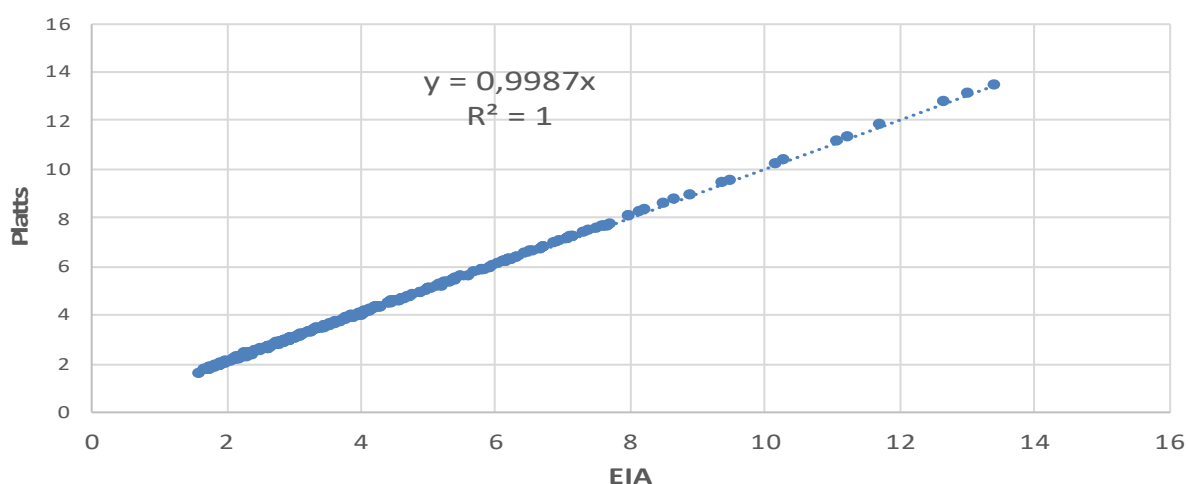


Figura 6 – Correlação linear dos preços médios mensais do *Henry Hub* marcados pela *Platts* em relação aos dados do EIA.

Com qualidade equivalente, a regressão dos dados do *Brent* para um histórico desde julho de 1987 até setembro de 2020 (399 dados), resultaram em β e R^2 igual a 1, conforme **Figura 7**. O desvio padrão de β desta amostra é de 1,3E-4.

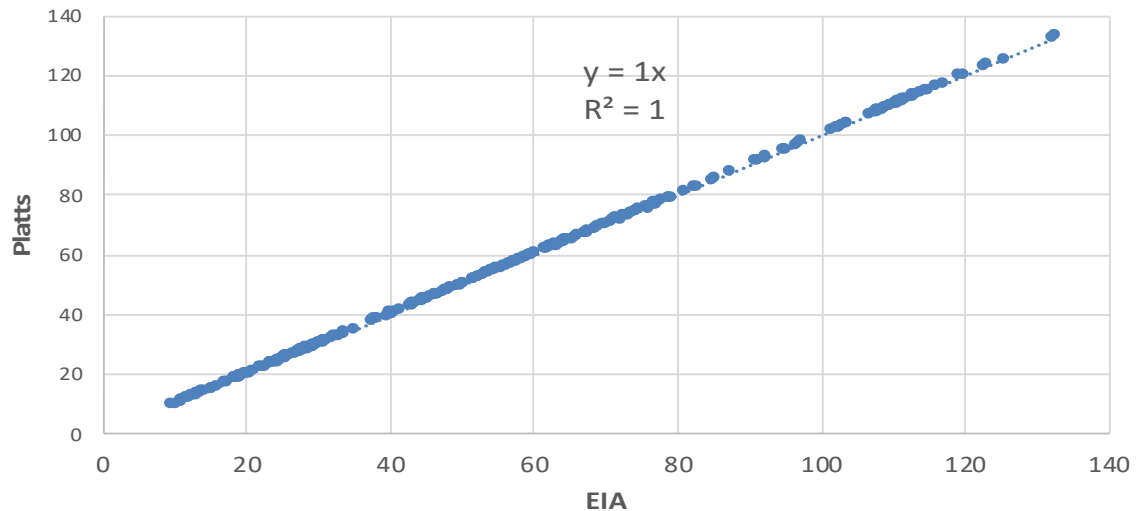


Figura 7 – Correlação linear dos preços médios mensais do *Brent* marcados pela *Platts* em relação aos dados do EIA.

No caso do NBP, a série disponível permitiu a regressão de 129 dados de preços, desde janeiro de 2010 até setembro de 2020, correlacionados entre as bases *Platts* e Ofgem. Conforme **Figura 8**, o coeficiente angular e o coeficiente de determinação apresentaram valores tendendo à unidade e desvio padrão de beta de 1,2E-3.

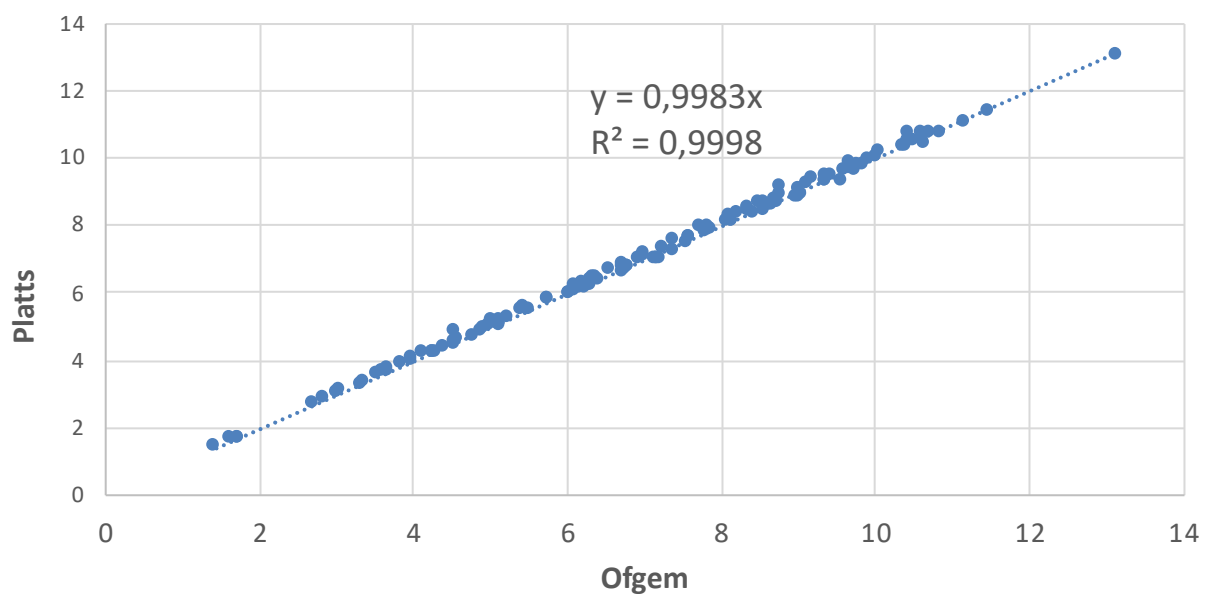


Figura 8 – Correlação linear dos preços médios mensais do NBP marcados pela *Platts* em relação aos dados do Ofgem.

No caso do JKM, a regressão linear considera os dados da *Platts* em relação ao GNL do Japão, do Banco Mundial, desde janeiro de 2010 até abril de 2021 (136 dados). Conforme se verifica na Figura 9, existe dispersão maior entre os dados das instituições, comparado aos marcadores anteriores. Os valores de β e de R^2 são 0,8481 e 0,9356, respectivamente. O desvio padrão beta verificado é de 1,9E-2.

Nota-se que, embora a variável JKM possa ser relativamente bem explicada pela correlação com os dados de GNL no Japão, o desvio padrão de beta neste caso apresenta ordem de grandeza duas vezes superior aos desvios padrão verificados para o *Henry Hub* e *Brent*. Isto faz com que o efeito da aversão ao risco em relação a β para este caso apresente sensibilidade significativamente superior comparado aos demais marcadores.

Os resultados verificados para os coeficientes de determinação das regressões dos quatro marcadores permitem a validação da hipótese 1.

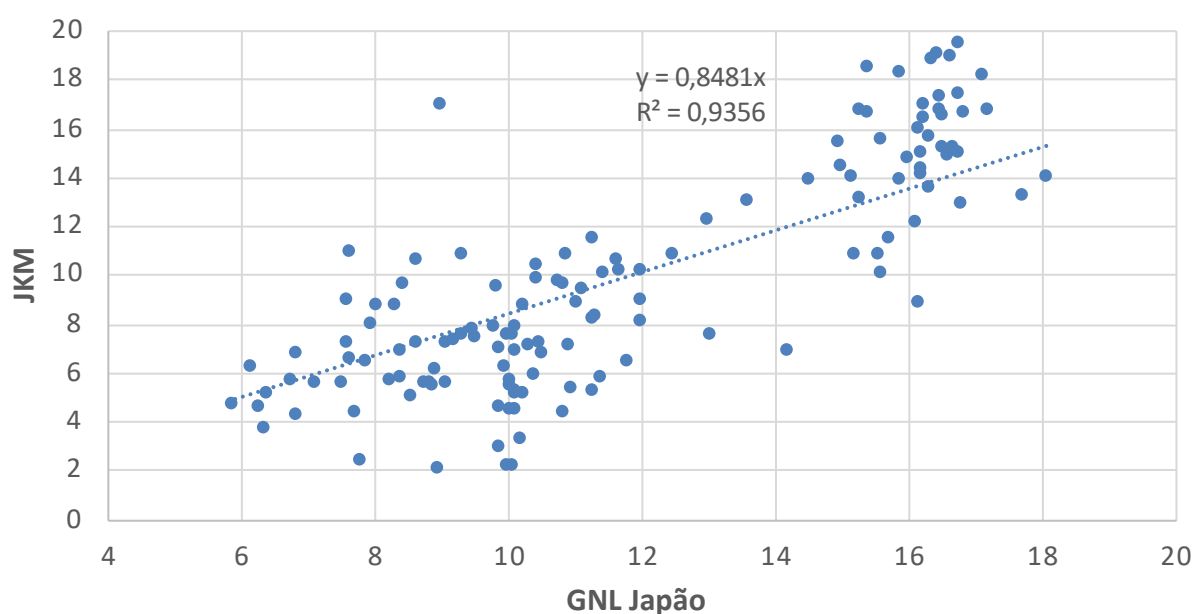


Figura 9 – Correlação linear dos preços médios mensais do JKM marcados pela *Platts* em relação aos preços médios mensais do GNL do Japão, marcados pelo Banco Mundial.

3.2 Hipóteses 2, 3 e 5

No método dos preços de referência, adota-se como base de dados para cálculo de volatilidade os preços históricos da *Platts* para cada um dos marcadores. A hipótese 2 estabelece que “ $\ln(P(k+t)) - \ln(P(k))$ ” pode ser representada por uma distribuição normal. Assim, um teste de aderência da distribuição de frequência do conjunto de dados à normal foi realizado pelo método qui-quadrado. A hipótese 3 estabelece que a média da distribuição tende a zero, enquanto a hipótese 5 estabelece que os dados são estatisticamente independentes.

No caso do *Henry Hub*, os 285 dados de preços permitiram a geração de 284 dados de diferenças logarítmicas de preços. Verificou-se pelo teste de hipótese qui-quadrado que os dados apresentam

aderência à curva normal, para um intervalo de confiança de 95%. A média da amostra resultou em valor nulo, bem como a covariância entre os dados. Portanto, as hipóteses 2, 3 e 5 são atendidas para esta amostra. Por fim, verificou-se um desvio padrão de 0,133 para a amostra.

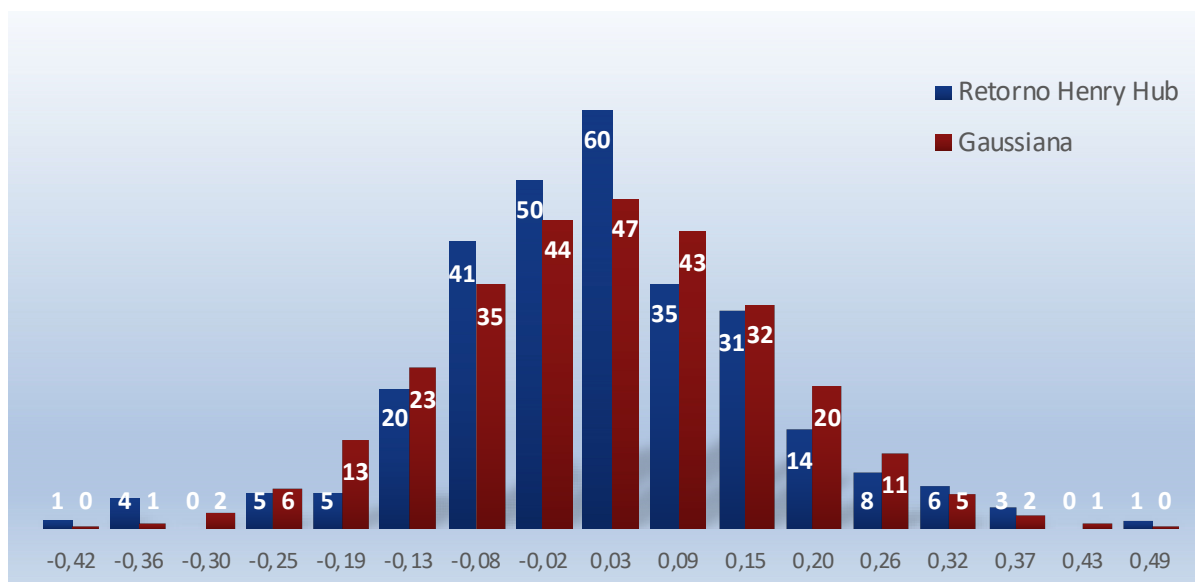


Figura 10 – Distribuição de frequência da relação logarítmica de preços para o Henry Hub, comparada à distribuição teórica gaussiana.

No caso do *Brent*, 398 dados foram avaliados. Identificou-se a presença de 4 *outliers*, que inviabilizam a aderência dos dados à distribuição normal pelo teste qui-quadrado. Os *outliers* correspondem a dados de agosto de 1990, março, abril e maio de 2020. Entende-se que a falha do modelo em agosto de 1990 pode estar atrelada à invasão do Iraque ao Kuwait e posterior Guerra do Golfo, que provocaram forte alta do preço do petróleo neste período, de forma atípica ao comportamento do mercado. A sequência das três falhas consecutivas do modelo em 2020 coincide com o período de guerra de preços pelo barril de petróleo entre a OPEP e a Rússia, o que provocou excesso de oferta de petróleo no mercado, impactando redução abrupta dos preços. Esta volatilidade foi ainda potencializada pela forte redução na demanda, provocada por medidas de isolamento social e redução da atividade econômica global, em função da pandemia do COVID-19.

Os dados verificados para os marcadores NBP e JKM também apresentaram *outliers*. No caso do NBP, foram analisados 128 dados e identificados 3 *outliers*: novembro de 2019, abril de 2020 e agosto de 2020. No caso do JKM, foram considerados 135 dados e identificados 3 *outliers*: fevereiro de 2020, agosto de 2020 e fevereiro de 2021.

Na busca por correlação entre as falhas do modelo com possíveis eventos, identificou-se que a alta elevada do NBP em novembro de 2019 poderia estar relacionada à proibição do fraturamento hidráulico pelo governo do Reino Unido, impactando a produção de gás de xisto e a elevação de preços. Em 2020, os marcadores JKM e NBP apresentam quedas acentuadas em fevereiro e abril, respectivamente, com recuperação acentuada em agosto, para ambos os casos. Entende-se que esta volatilidade esteja atrelada a impactos econômicos causados pelo COVID-19, que afetaram diretamente a demanda por gás natural. O pico de preço em fevereiro de 2021 para o JKM foi provocado por um conjunto de fatores que incluem condições climáticas rigorosas de inverno e restrições operacionais na oferta de GNL.

Sem a presença dos *outliers*, para todos os marcadores o teste de aderência dos dados à distribuição normal foi atendido pelo método qui-quadrado, considerando um intervalo de confiança de 95%. As distribuições de frequências dos marcadores *Brent*, NBP e JKM, sem os *outliers*, são apresentados nas figuras a seguir.

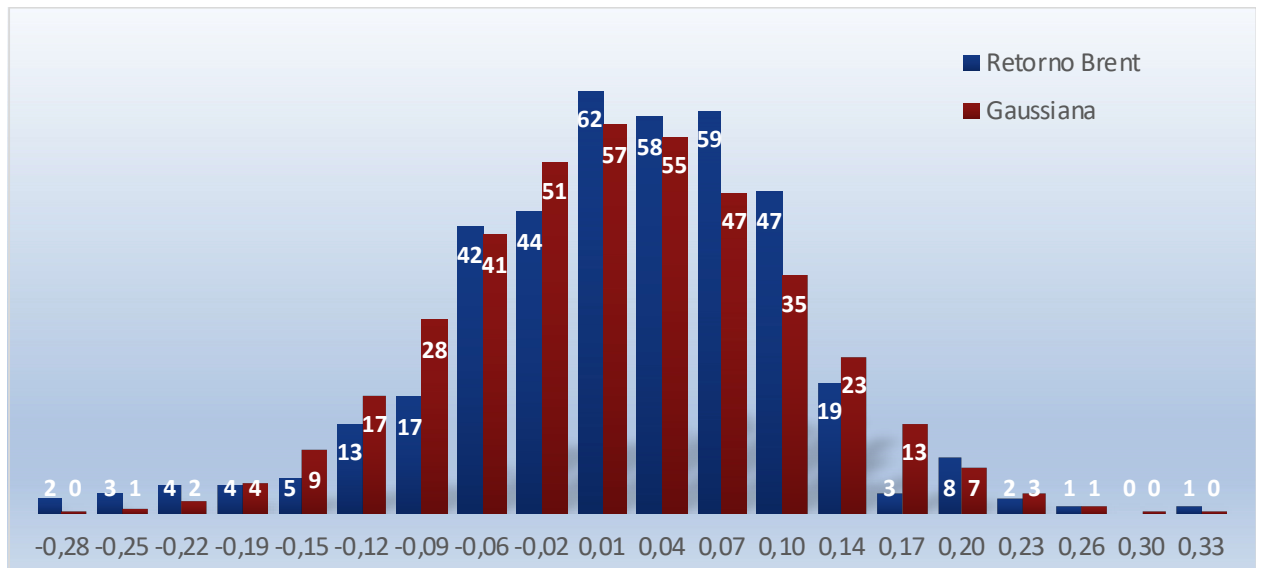


Figura 11 – Distribuição de frequência da relação logarítmica de preços para o *Brent*, comparado à distribuição teórica gaussiana.

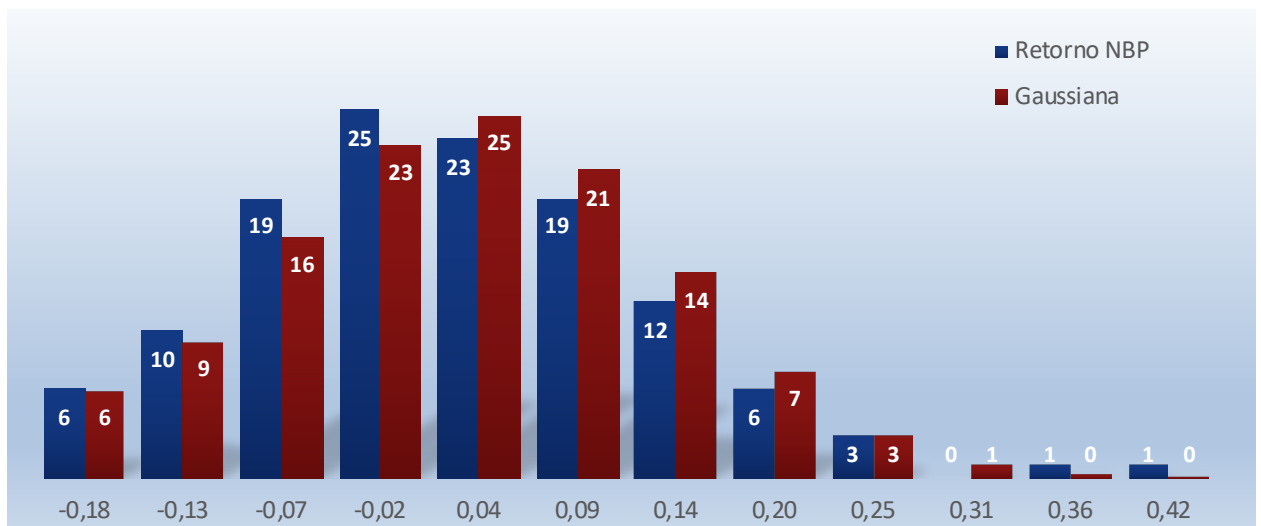


Figura 12 – Distribuição de frequência da relação logarítmica de preços para o NBP, comparado à distribuição teórica gaussiana.

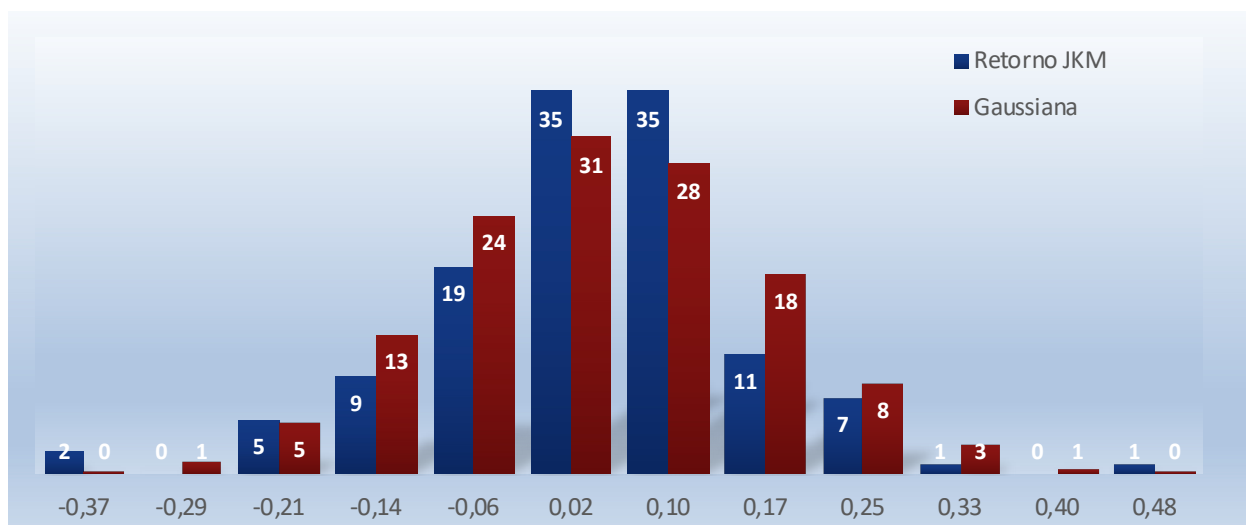


Figura 13 – Distribuição de frequência da relação logarítmica de preços para o JKM, comparado à distribuição teórica gaussiana.

Para se entender os efeitos da presença dos *outliers* nas principais estatísticas das séries de dados observadas, apresentam-se na Tabela 1 os resultados de média, desvio padrão e covariância de dados para *Henry Hub*, *Brent*, *NBP* e *JKM*, com e sem os *outliers*.

Tabela 1 – Principais estatísticas das séries de dados dos preços dos combustíveis.

Marcador	Henry Hub				Brent			NBP			JKM		
Condição da amostra	Completa	Completa	Sem outliers	Var.	Completa	Sem outliers	Var.	Completa	Sem outliers	Var.	Completa	Sem outliers	Var.
Tamanho da amostra	284	398	394	1%	128	125	2%	135	132	2%			
Média	0,00	0,00	0,00	-	0,00	-0,01	-	0,00	0,00	-			
Desvio padrão	0,13	0,10	0,09	13%	0,13	0,11	16%	0,16	0,13	19%			
Covariância	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	-	6E-03	6E-03	-			

Conforme se pode observar, os *outliers* não afetaram significativamente as hipóteses 3 e 5, uma vez que os valores de média e covariância permaneceram próximos a zero para todos os casos. Efeito significativo é percebido no desvio padrão das amostras, com valores maiores na presença dos *outliers*, por provocarem maior dispersão entre os dados. Se, por um lado, a presença dos *outliers* afasta a hipótese de aderência das amostras à distribuição normal, por outro, o impacto no aumento do desvio padrão tende a fazer com que os cálculos dos preços de referência com aversão ao risco resultem em valores mais conservadores, provocando o efeito esperado para fins de aversão ao risco.

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que as hipóteses 3 e 5 são atendidas em qualquer caso e que a hipótese 2 é atendida sob ressalvas. Devido ao fato de os *outliers* terem apresentado baixa frequência, estando possivelmente relacionados a eventos extremos, externos ao mercado e de difícil previsibilidade, e por não implicarem em sinalizações econômicas dos preços de referência contrárias ao esperado, opta-se por acolher a hipótese 2 para os cálculos dos preços de referência, considerando a presença de *outliers*.

3.3 Hipótese 4

A hipótese 4 admite que a volatilidade futura dos preços dos combustíveis terá o mesmo desempenho observado no passado. Isto permite inferir que o desvio padrão a ser observado no futuro, terá valor semelhante ao realizado.

Entende-se que esta hipótese é forte e pouco provável de se verificar como verdadeira em estudos de longo prazo. Isto porque espera-se que a evolução dos mercados de combustíveis, bem como a dinâmica das relações geopolíticas, implique em alterações de médio e longo prazos nos comportamentos dos preços, afetando a volatilidade ao longo do tempo.

Neste trabalho, realizou-se uma análise do quanto esta hipótese pode se desviar da realidade, especificamente para os históricos de preços do *Henry Hub* e do *Brent*. Foram considerados valores de desvios padrão de acordo com a equação (15), aplicável a horizontes temporais de 120 meses, a encerrar-se em dezembro do ano anterior. Deste modo, um valor de desvio padrão foi obtido por ano. Foi calculado um intervalo de confiança de 95% para os desvios padrão amostrais, com o objetivo de se obter limites superior e inferior, conforme a seguinte equação:

$$\sqrt{\frac{119 \hat{\sigma}^2}{\chi_{119,2,5\%}^2}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{119 \hat{\sigma}^2}{\chi_{119,97,5\%}^2}} \quad (21)$$

Onde:

- $\hat{\sigma}$: é o desvio padrão da amostra, da equação (15);
- σ : é o desvio padrão da população, quando o número de dados tende a infinito;
- $\chi_{119,2,5\%}^2$ e $\chi_{119,97,5\%}^2$: são os valores de qui-quadrado com 119 graus de liberdade e frequências de 2,5% e 97,5%, compondo o intervalo de confiança de 95%.

No caso do *Henry Hub*, foram avaliados valores de desvio padrão desde 2007 até 2020, conforme se pode observar na Figura 14. O ponto máximo do limite inferior ocorre no ano de 2010, com valor de 0,134, enquanto o ponto mínimo do limite superior do desvio padrão ocorre em 2020, com valor de 0,114. O máximo desvio das observações da realidade em relação à hipótese foi calculado a partir da diferença percentual entre estes dois valores, que teve como resultado 15%.

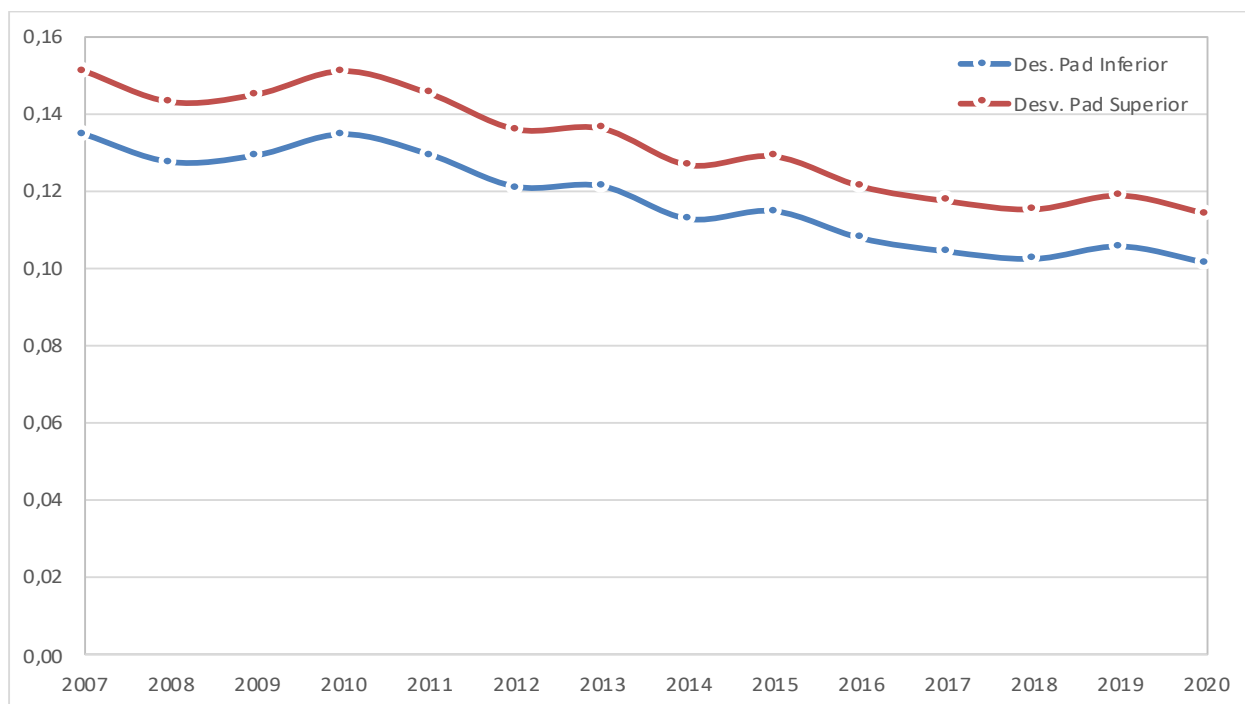


Figura 14 – Desvios padrão superior e inferior calculados para o *Henry Hub* (2007 a 2020).

No caso do *Brent*, foram avaliados valores de desvio padrão desde o ano de 2002 até 2020, conforme Figura 15. O ponto máximo do limite inferior ocorre no ano de 2009, sendo 0,092. O ponto mínimo do limite superior ocorre no ano de 2020, sendo 0,079. Neste caso, o máximo desvio da hipótese em relação à realidade teve como resultado o valor de 14%.

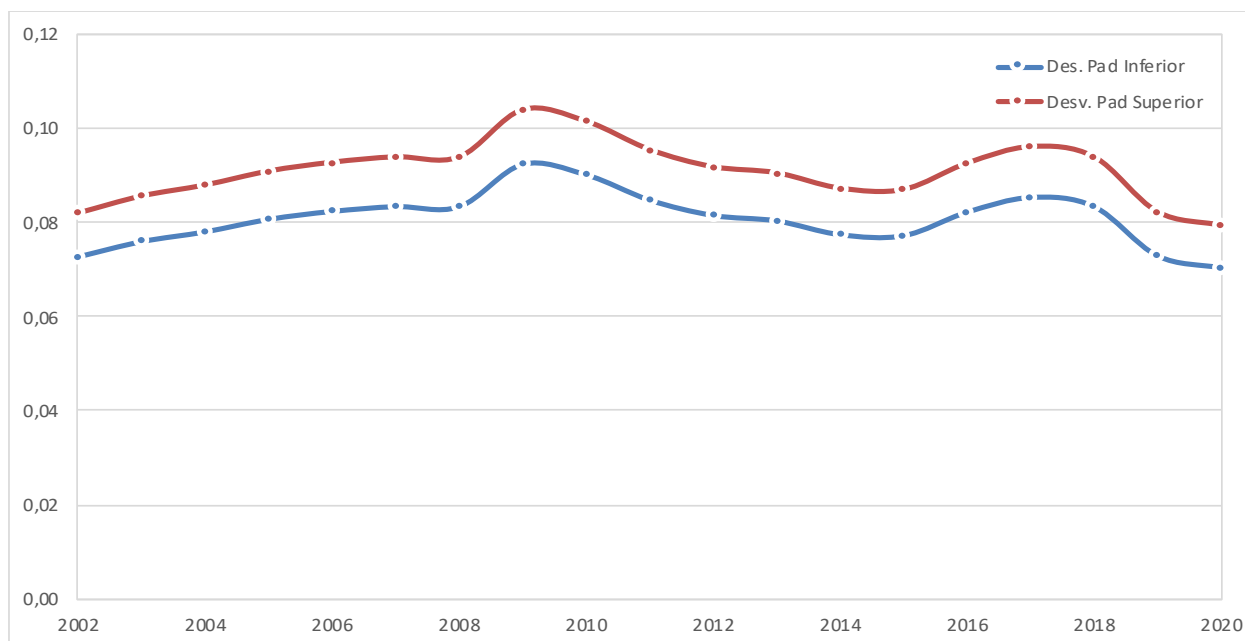


Figura 15 – Desvios padrão superior e inferior para o *Brent* (2002 a 2020).

Embora se verifique violação da hipótese 4 com os resultados apresentados, entende-se que os desvios observados na realidade em relação à hipótese apresentam valores aceitáveis, de modo que a hipótese é acolhida sob ressalvas.

Embora as hipóteses 2 e 4 tenham demonstrado capacidade representativa limitada, optou-se por adotar o novo método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis aqui exposto pelo benefício de sua simplicidade e capacidade de condensação dos atributos de competitividade e previsibilidade de preços. Entende-se que a direção e o sentido dos sinais econômicos obtidos com os aprimoramentos aqui expostos apontam para os incentivos esperados nos leilões de energia.

4 Resultados

A obtenção de resultados do método aqui proposto necessita previamente que valores para os parâmetros α_1 e α_2 da equação (20) sejam estabelecidos. Estes parâmetros definirão o nível de aversão ao risco em relação à volatilidade dos preços futuros e à correlação histórica β . Por isonomia, os valores de α_1 e α_2 devem ser os mesmos para todos os preços de referência. Neste estudo, adotou-se como referência para a obtenção destes parâmetros o mercado do JKM, por se tratar do marcador que tem apresentado recentemente preços de referência menos conservadores em termos médios e por se tratar do mercado com maior volatilidade. Adotou-se o ano de 2021 como referência para os cálculos.

4.1 Valores para α_1 e α_2

O parâmetro α_2 , da equação (10), estabelece um nível de aversão ao risco para a correlação histórica entre os dados da *Platts* e das instituições públicas. Para se identificar um valor adequado para α_2 e, conseqüentemente para Z_{α_2} , adotaram-se limites superior e inferior para β . Aplicável ao JKM, considerou-se como limite inferior o resultado de β da correlação dos 136 dados apresentados na Figura 9, que é $\beta = 0,8481$.

Para o limite superior, considerou-se uma análise de correlação entre os preços de contratos futuros do JKM e a expectativa de preços futuros para o GNL do Japão, segundo o Banco Mundial. As informações de contratos futuros foram obtidas no mês de maio de 2021, no sítio eletrônico da CME Group⁷, que traz resultados de ofertas e negociações na NYMEX – *New York Mercantile Exchange*. Foram obtidos valores de preços de contratos futuros para o JKM a partir de junho de 2021 até dezembro de 2026. Destaca-se que não foi identificada oferta de contratos futuros para o JKM após dezembro de 2026, fato que restringe a análise da visão de futuro neste exercício. Os preços em base mensal foram ajustados para valores médios anuais, para fins de comparação com a discretização anual para o GNL do Japão. O relatório do Banco Mundial foi publicado em abril de 2021. Os preços de contratos futuros do JKM, bem como os preços do GNL do Japão, são apresentados na Figura 16.

⁷ https://www.cmegroup.com/trading/energy/natural-gas/lng-japan-korea-marker-platts-swap_quotes_globex.html?optionExpiration=8571-Q1&optionProductId=8571

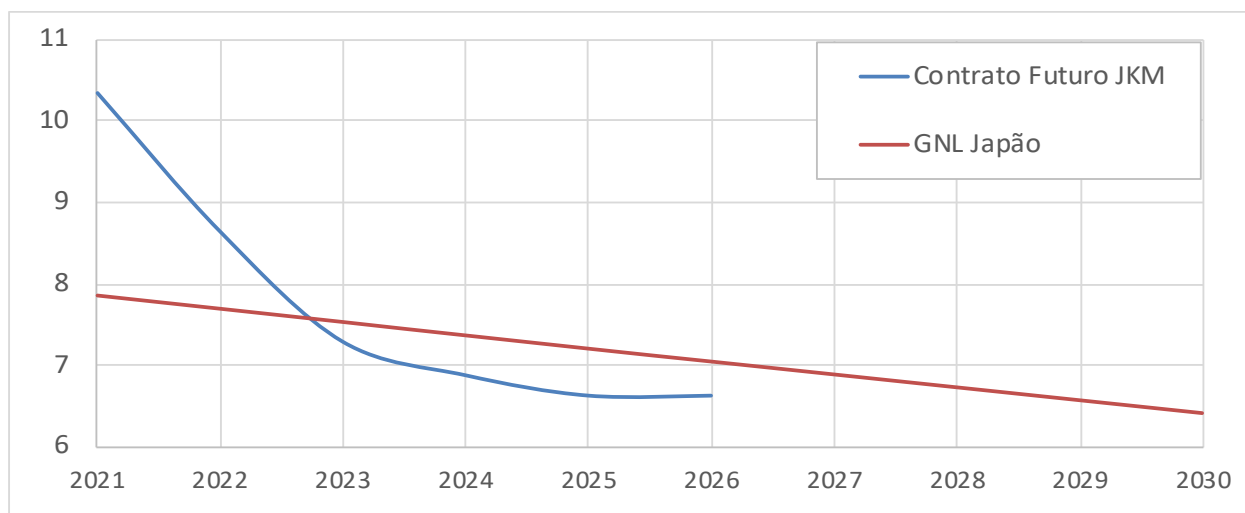


Figura 16 – Preços médios anuais de contratos futuros para o JKM e expectativa de preços do Banco Mundial para o GNL do Japão.

Conforme se pode verificar na Figura 16, os preços de contratos futuros para o JKM apresentam um efeito conjuntural bastante acentuado nos anos de 2021 e 2022, convergindo assintoticamente para a estabilidade a partir do ano de 2023. Como, conceitualmente, se busca nos preços de referência uma visão estrutural para a expectativa de preços futuros, adotou-se para fins de correlação a expectativa dos preços de 2023 até 2026 entre o GNL do Japão e o JKM. O resultado da correlação é apresentado na Figura 17, com $\beta = 0,9397$. Este valor define o limite superior para o critério de aversão ao risco de β .

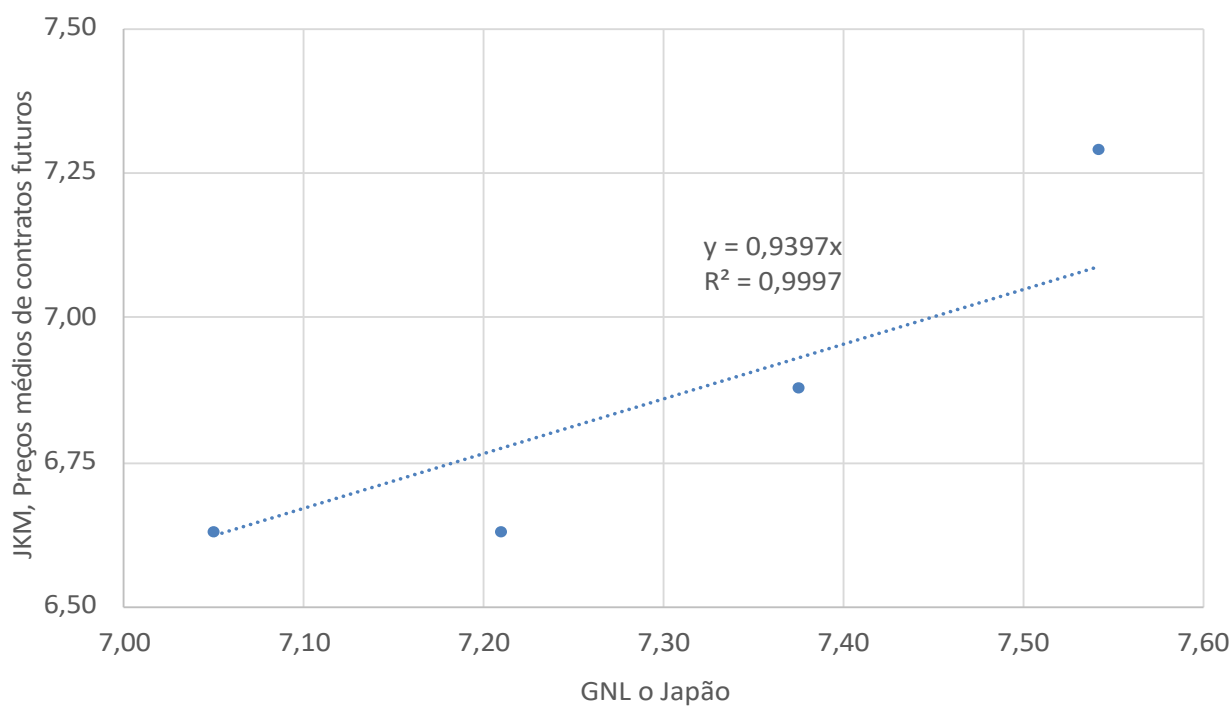


Figura 17 – Correlação entre os preços para o GNL do Japão e contratos futuros do JKM entre 2023 e 2026.

Com as correlações de passado e de expectativa de preços futuros, estima-se que o valor de β_{α_2} , da equação (10) se encontre entre estes limites acima apresentados, cujo ponto central é 0,8939. O valor de β para o JKM no ano de 2021 considera 120 meses de preços médios históricos, a partir de janeiro de 2011 até dezembro de 2020, conforme equação (8), sendo a variável independente os preços médios históricos mensais do GNL do Japão, publicados pelo Banco Mundial, e a variável dependente os preços médios mensais do JKM, da *Platts*. Os resultados obtidos são $\beta = 0,8543$ e $\sigma_\beta = 1,98E - 2$. Admitindo-se um nível de aversão ao risco $\alpha_2 = 97,7\%$, obtém-se exatamente $Z_{\alpha_2} = 2,00$ pela distribuição normal. Com estes valores, os cálculos pela equação (10) podem ser realizados da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\beta_{\alpha_2} &= \beta + Z_{\alpha_2} \sigma_\beta \\ \beta_{\alpha_2} &= 0,8543 + 2,00 \cdot 1,98E - 2 \\ \beta_{\alpha_2} &= 0,8938\end{aligned}$$

Este resultado se apresenta suficientemente próximo ao ponto central dos limites estabelecidos, de 0,8939 conforme mencionado acima. Com isto, admite-se como parâmetro para os preços de referência:

$$Z_{\alpha_2=97,7\%} = 2,00 \quad (22)$$

O valor da aversão ao risco para os preços de referência do JKM também foi obtido, com base na Figura 16. Adotou-se como limite inferior a média dos preços dos contratos futuros do JKM entre 2023 e 2026, valores que apresentam tendência de convergência assintótica dos preços futuros no longo prazo. O resultado obtido para a média dos preços futuros do JKM foi de US\$ 6,85 /MMBTU. Como limite superior, adotou-se o preço médio da expectativa de preço do GNL do Japão, conforme equação (6), entre os anos de 2021 e 2030, igual a US\$ 7,14 /MMBTU. Entende-se que o resultado do preço de referência para a JKM, incluindo-se o critério de aversão ao risco, deveria estar entre estes dois limites, e de forma conservadora mais próximo do limite superior.

O desvio padrão do JKM foi calculado segundo a equação (15), considerando o horizonte de janeiro de 2011 a dezembro de 2020, englobando 120 meses. O valor obtido foi de $\hat{\sigma}_{P_F} = 0,136$. Considerando o valor de $E\{P_F\} = \text{US\$}7,14/\text{MMBTU}$ e $\beta_{\alpha_2} = 0,8938$, e assumindo o coeficiente de aversão ao risco de volatilidade $\alpha_1 = 54,0\%$, o que resulta em $Z_{\alpha_1=54,0\%} = 0,10$, obteve-se o seguinte resultado para o preço de referência do JKM:

$$\begin{aligned}P_{ref} &= E\{P_F\} \cdot e^{(Z_{\alpha_1} \sqrt{60,5} \cdot \hat{\sigma}_{P_F})} \cdot (\beta + Z_{\alpha_2} \hat{\sigma}_\beta) \\ P_{ref} &= 7,14 \cdot e^{(0,1 \sqrt{60,5} \cdot 0,136)} \cdot 0,8938 \\ P_{ref} &= \text{US\$}7,09/\text{MMBTU}\end{aligned}$$

Como o preço de referência para ao JKM se encontra dentro dos limites previamente estabelecidos, entende-se como adequada a adoção a seguir para as avaliações dos preços de referência:

$$Z_{\alpha_1=54,0\%} = 0,10 \quad (23)$$

É importante destacar que os valores obtidos aqui para α_1 e α_2 devem ser os mesmos para todos os marcadores de preços internacionais expostos na equação (4) e não devem ser considerados estanques para cálculos dos preços de referência em leilões futuros. É possível que mudanças como aprimoramentos nos CCEARs, a evolução do mercado de gás natural nacional ou a variação na percepção de riscos ao consumidor de eletricidade impliquem na revisão destes parâmetros, caso o novo método permaneça vigente ao longo do tempo.

4.2 Análise Comparativa de Resultados Históricos

Com os parâmetros α_1 e α_2 estabelecidos, foi realizada uma análise comparativa dos resultados de preços de referência pelo método vigente, cujos resultados são aqueles apresentados no item 1.2, na Figura 3, com o novo método apresentado neste trabalho, considerando os anos entre 2016 e 2020. Para o novo método, foram avaliados resultados para $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, ou seja, sem aversão ao risco, bem como para valores de α_1 e α_2 apresentados nas equações (22) e (23). Estes dados são ainda comparados com a média das expectativas de preços futuros para o horizonte de 10 anos de cada marcador, conforme equação (6). Os resultados são apresentados nas figuras a seguir.

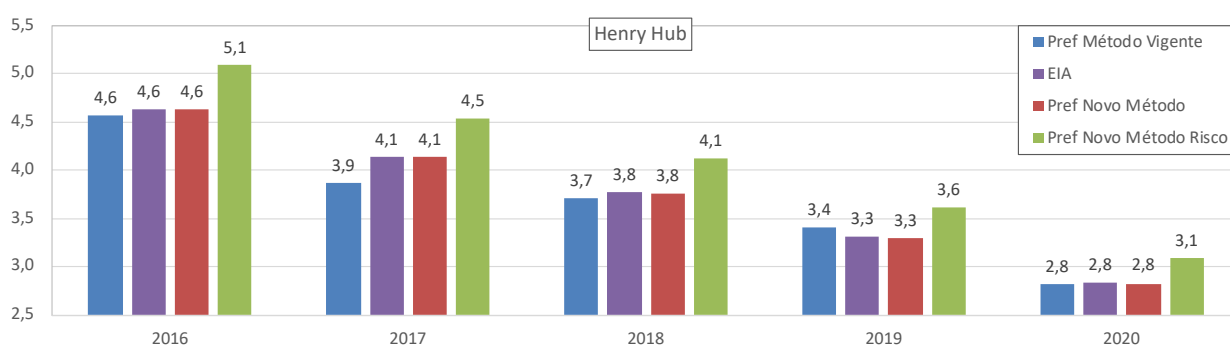


Figura 18 – Comparativo de preços de referência para o *Henry Hub*.

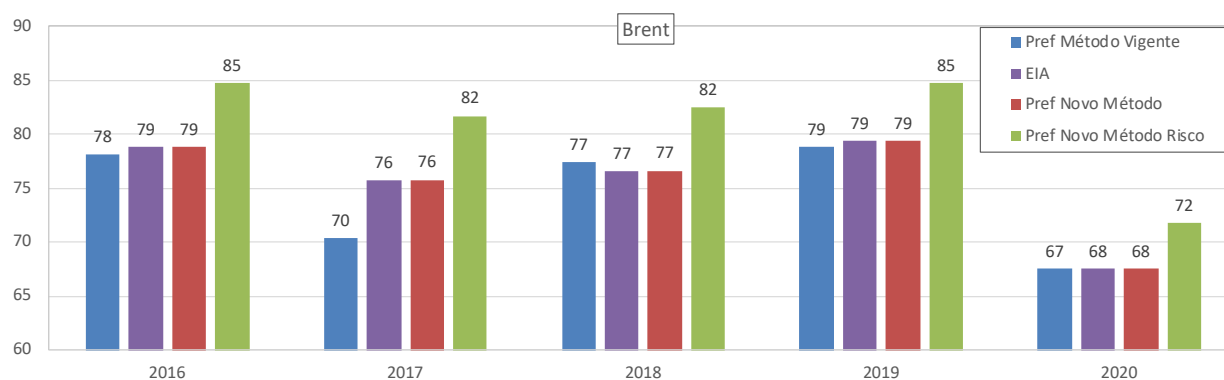


Figura 19 – Comparativo de preços de referência para o *Brent*.

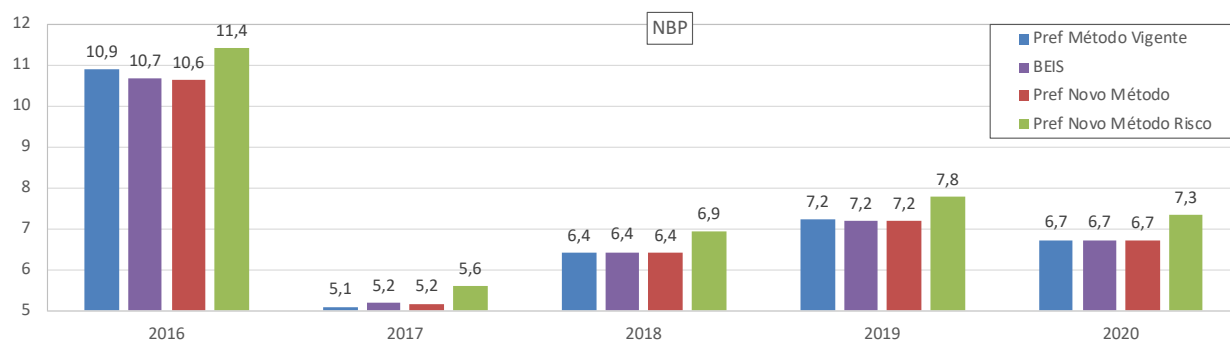


Figura 20 – Comparativo de preços de referência para o NBP.

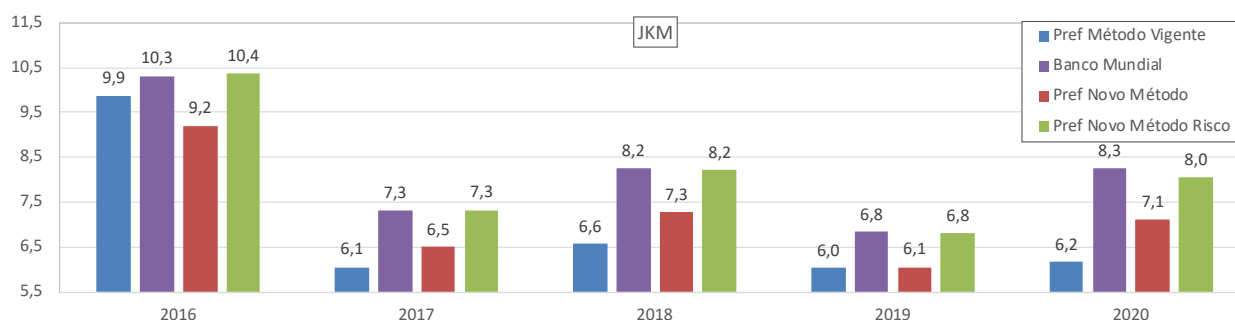


Figura 21 – Comparativo de preços de referência para o JKM.

A partir dos resultados apresentados nas figuras acima, é possível obter algumas conclusões. Nos casos do *Henry Hub*, *Brent* e *NBP*, verifica-se, de modo geral, que os valores obtidos para o método vigente e para o método novo sem aversão ao risco convergem entre si para a expectativa de preço médio futuro do marcador correspondente. Os parâmetros de aversão ao risco tendem a resultar em preços mais conservadores, no sentido do que se esperava. Os resultados demonstram que o novo método não se trata de uma ruptura em relação ao método vigente, mas de uma abordagem mais aprimorada, de modo a se condensar nos preços de referência, além das expectativas médias dos preços futuros, os critérios de aversão ao risco.

No caso do *JKM*, os resultados da Figura 21 mostram que o novo método sem aversão ao risco, em geral, tende a apresentar valores com maior estabilidade entre os leilões que os resultados obtidos pelo método vigente, além de serem mais próximos às expectativas para o GNL do Japão. Entende-se que este comportamento se deve principalmente à extensão da série histórica adotada para a correlação entre as bases da *Platts* e do Banco Mundial. No método vigente esta série considera um intervalo de 36 meses, enquanto no novo método o intervalo considerado é de 120 meses.

O efeito da elevada volatilidade do *JKM* tende a pesar mais significativamente em resultados conservadores dos preços de referência com aversão ao risco, quando comparado com os efeitos nos demais marcadores. Isto pode ser observado na Tabela 2, que traz resultados obtidos para o ano de 2020 pelo método vigente e pelo novo método, com aversão ao risco. O impacto nos preços do *JKM* foi o maior entre todos, com variação de 30%. Isto faz com que a competitividade relativa entre os marcadores de preços seja mais equilibrada pelo novo método do que pelo método vigente. A título de exemplo, a

diferença entre os preços do JKM e do *Henry Hub* no método vigente é de US\$ 3,38 /MMBTU. Pelo novo método, esta diferença é de US\$ 4,95 /MMBTU.

Tabela 2 – Comparação dos preços de referência dos combustíveis pelo método vigente e pelo novo método, com aversão ao risco, para o ano de 2020. (Fonte: CCEE, 2021 / NT-CCEE-03642/2021).

Fonte	HH	Brent	NBP	JKM
Método Vigente	2,81	67,49	6,73	6,19
Novo Método	3,09	71,85	7,29	8,04
Variação	10%	6%	8%	30%

4.3 Preços de Referência para o Leilão de Energia Nova A-5/2021

Para o leilão de energia nova A-5/2021 foram calculados os preços de referência considerando o método vigente e o novo método, proposto no presente trabalho. Os resultados foram obtidos com o apoio da CCEE, que tem acesso à base de dados *Platts*. Conforme se pode observar na Tabela 3, o efeito da aversão ao risco impactou em aumento de até 7% nos preços do *Henry Hub*, *Brent* e *NBP*. No caso do *JKM*, o método vigente resultou em preço de US\$ 4,86 /MMBTU. Este valor é demasiadamente otimista quando comparado aos preços médios dos contratos futuros indexados a *JKM* negociados no mercado, cujos valores médios anuais se encontram acima de US\$ 6,50 /MMBTU. Adicionalmente, o valor calculado pelo método vigente se encontra substancialmente abaixo da média de 10 anos à frente do GNL do Japão estimada pelo Banco Mundial, de US\$7,14 /MMBTU. Pelo novo método, o preço do *JKM* guarda relação mais adequada com as duas referências mencionadas, tendendo a um preço mais conservador entre elas, devido ao critério de aversão ao risco.

Tabela 3 – Comparação dos preços de referência dos combustíveis pelo método vigente e pelo novo método, com aversão ao risco, para o LEN A-5/2021. (Fonte: CCEE, 2021/ NT-CCEE-03853/2021).

Fonte	HH	Brent	NBP	JKM
Método Vigente	3,14	63,19	7,71	4,86
Novo Método	3,36	67,30	7,81	7,09
Variação	7%	7%	1%	46%

O critério de aversão ao risco nos preços de referência abre espaço para o incentivo à indexação do CVU e do RFCComb à moeda nacional. Como o novo método tende a calcular preços de referência mais elevados em relação ao método vigente, os resultados de CVU e RFCComb dos agentes que optarem por se indexar aos preços internacionais, tenderão a ser mais caros pelo novo método. Isto não ocorre no caso dos agentes que se indexarem à moeda nacional. Entende-se que esta medida pode contribuir para que as opções dos agentes geradores se alinhem à preferência dos consumidores por previsibilidade de preços.

Adicionalmente, espera-se que as soluções de suprimento a gás natural de origem nacional ganhem competitividade com o novo método, uma vez que tendem a apresentar parcela mais significativa dos custos atrelada ao Real brasileiro do que soluções de suprimento com combustível importado. Isto permite o repasse dos custos de produção do combustível nos CCEARs com indexação à moeda nacional sem custos de hedge.

5 Considerações Finais

O novo método de cálculo dos preços de referência dos combustíveis tem por proposta dois objetivos:

- i. aprimorar a robustez do método para dar maior confiabilidade aos preços de referência dos combustíveis;
- ii. incluir o atributo de aversão ao risco de volatilidade, de modo a se refletir na competição não somente a preferência do consumidor pelos menores preços, mas também pelos preços com maior previsibilidade.

De acordo com os resultados apresentados para os anos de 2016 a 2020, verifica-se que o novo método conferiu maior estabilidade aos preços de referência, especialmente do JKM, a partir da adoção de séries históricas mais longas para a correlação de dados. Adicionalmente, a adoção de parâmetro de volatilidade conferiu competitividade mais ampla entre os marcadores de preços, uma vez que os atributos “menor preço” e “maior previsibilidade” são levados em consideração na composição dos preços de referência.

O fato de os parâmetros de aversão ao risco resultarem em preços mais conservadores para todos os marcadores internacionais faz com que a opção de indexação dos custos com combustível à moeda nacional ganhe mais competitividade, podendo favorecer tanto o consumidor de eletricidade, pela maior previsibilidade de preços ao longo do CCEAR, quanto os potenciais produtores de gás de origem nacional, que naturalmente possuem uma parcela considerável de seus custos atrelados à moeda nacional. Cabe destacar que os preços de referência dos combustíveis são parâmetros aplicáveis estritamente à etapa de competição nos leilões. Os reajustes reais dos preços, no caso de empreendimentos vencedores de leilões que entrarem em operação comercial, ocorrerão segundo os preços vigentes no mercado à época, sem relação com os preços de referência.

Na etapa de validação de cinco principais hipóteses que fundamentam o modelo aqui adotado, verificou-se que três delas se mostraram válidas e duas apresentaram validade sob ressalvas. Em todo caso, os sinais econômicos para o novo método apontam para os incentivos e premissas de precificação desejados. Por esta razão, e pela simplicidade do método, optou-se pela abordagem aqui apresentada, sem prejuízo de possíveis aprimoramentos futuros.

Por fim cabe destacar que os elementos trazidos neste trabalho derivam de um determinado histórico de preços. A complexa dinâmica dos mercados internacionais dos energéticos pode provocar mudanças impactantes, o que demanda o monitoramento constante do método aqui exposto, não impedindo eventuais revisões.