

## Seca e risco de crédito: evidência em hidrelétricas na Amazônia

Cláudio da Silva Câmara

claudiocamara10@hotmail.com

### RESUMO

Este estudo examina como choques hidro climáticos afetam a geração de energia e como essas perdas operacionais são transmitidas para receita e risco de crédito em hidrelétricas da Bacia Amazônica. Para isso, estima modelos de regressão linear e ARDL com dados mensais (2016–2025) das usinas Santo Antônio Energia (SA) e Belo Monte (BM), combinando a relação entre geração e variáveis climáticas e hidrológicas com a mensuração da transmissão financeira do choque por meio de elasticidades geração–receita e do indicador *Revenue-at-Risk* (RaR10), associado a uma queda padronizada de 10% na produção. Os resultados mostram que choques de temperatura e vazão afetam de forma relevante a geração, com heterogeneidade entre usinas, e que essa heterogeneidade também se manifesta na materialidade financeira do choque. Em termos financeiros, as evidências indicam maior resiliência relativa em SA e maior vulnerabilidade em BM, com implicações para solvência e crédito.

Palavras-chave: seca amazônica, geração hidrelétrica, risco climático físico, *Revenue-at-Risk*, risco de crédito.

Classificação JEL: Q40, Q41, G32.

### 1 Introdução

A matriz elétrica brasileira caracteriza-se por elevada dependência da geração hidrelétrica, que responde por parcela majoritária da oferta de eletricidade no país (EPE, 2025). Embora essa configuração reflita a disponibilidade relativa de recursos hídricos, ela também expõe o sistema elétrico a vulnerabilidades estruturais associadas à intensificação das mudanças climáticas e à recorrência de secas prolongadas (Brasil, 2024). Na Amazônia, essa dependência foi reforçada pela expansão de grandes empreendimentos, como as hidrelétricas SA e BM, inseridas em bacias com elevada sensibilidade hidrológica e crescente instabilidade climática.

Episódios recentes de estiagem, notadamente em 2005, 2010, 2016 e 2023, evidenciaram como anomalias hidrometeorológicas podem afetar a produção hidrelétrica e o equilíbrio do sistema elétrico nacional (Espinoza et al., 2024). A combinação entre aumento da temperatura, redução da precipitação e alterações no

regime atmosférico compromete as vazões fluviais, afetando a geração de energia e produzindo impactos econômicos relevantes, como maior acionamento de termelétricas e pressões tarifárias (IEA, 2021; Kotz et al., 2022). Além dos riscos à segurança energética, esses choques climáticos podem repercutir diretamente sobre a estabilidade econômico-financeira das hidrelétricas, ao afetarem a capacidade de geração e a receita operacional, com implicações para o risco de crédito (Hamilton et al., 2020).

Em resposta, organismos regulatórios e autoridades financeiras passaram a incorporar o risco climático às agendas prudenciais, recomendando sua inclusão em testes de estresse e análises de crédito setoriais (NGFS, 2025; Banco Central do Brasil, 2023). No Brasil, o setor hidrelétrico figura entre os mais expostos aos riscos físicos do clima, dada a concentração da geração em bacias sujeitas à elevada variabilidade hidrológica (EPE, 2022; Silva et al., 2023). Apesar disso, ainda são limitados os estudos que quantificam, de forma integrada e em nível corporativo, como choques climáticos físicos se traduzem em efeitos sobre geração, receita e implicações para o risco de crédito em hidrelétricas específicas, particularmente na Amazônia.

A crescente variabilidade climática na Bacia Amazônica tem alterado regimes hidrológicos e afetado a geração de energia, com possíveis repercussões sobre receita e estabilidade econômico-financeira das hidrelétricas. Secas e eventos extremos reduzem vazões, comprometem a produção e podem pressionar custos e rentabilidade. Esses efeitos, contudo, não são homogêneos entre usinas, pois mecanismos operacionais, contratuais e institucionais podem amortecer ou ampliar a transmissão do choque físico para os resultados financeiros.

Ao enfrentar essa lacuna, este estudo investiga de que forma choques climáticos e hidrológicos se convertem em impactos sobre geração, receita e implicações para o risco de crédito, com base em evidência quantitativa comparável entre as usinas SA e BM. A hipótese central é que choques climáticos adversos afetam a geração hidrelétrica e são transmitidos para receita e risco econômico-financeiro, embora com intensidade distinta entre usinas. Em particular, espera-se que estiagens e reduções de vazão produzam quedas relevantes na geração e na receita operacional, e que essa transmissão seja condicionada por características estruturais, operacionais e contratuais de cada usina.

O objetivo do estudo é analisar como choques de seca e variabilidade hidrológica afetam a geração de energia e sua transmissão para receita e risco econômico-financeiro em hidrelétricas da Bacia Amazônica, com foco nas usinas SA e BM. Especificamente, o

estudo quantifica a sensibilidade da geração a variáveis climáticas e hidrológicas, estima o efeito da produção sobre a receita, avalia a materialidade financeira de cenários de estresse e compara a exposição relativa das duas usinas, com vistas a extrair implicações para gestão de risco climático e análise prudencial.

A contribuição do estudo é dupla. No plano empírico, estima magnitudes, defasagens e mecanismos dinâmicos que conectam variáveis climáticas e hidrológicas à geração e à receita, produzindo evidência replicável em nível de usina. No plano aplicado, o estudo não se limita a documentar sensibilidade hidro climática: ele oferece uma ponte empiricamente estimável entre exposição física, desempenho operacional e materialidade financeira, ao incorporar uma métrica de receita em risco e traduzir choques físicos em vulnerabilidade financeira mensurável. Com isso, contribui para a literatura de finanças climáticas ao mensurar, em nível de usina, a transmissão de choques físicos para receita, exposição financeira e implicações para o risco de crédito, com utilidade para análise de crédito, *stress testing*, gestão de risco corporativo e discussões prudenciais no setor elétrico.

A análise cobre o período de abril de 2016 a janeiro de 2025 e utiliza dados mensais climáticos, hidrológicos e econômico-financeiros provenientes de fontes oficiais e institucionais. Metodologicamente, o estudo se concentra em modelos de regressão linear e ARDL, além de exercícios de estresse ao longo do canal clima → hidrologia → geração → desempenho financeiro. Os resultados não são extrapolados para o conjunto do parque hidrelétrico brasileiro nem para a totalidade das usinas da Bacia Amazônica, dado o recorte em duas usinas e as restrições de dados; tampouco o estudo pretende desenvolver modelagem hidrodinâmica, análise contratual detalhada ou projeções climáticas estruturais. O foco é estimar elasticidades e multiplicadores dinâmicos em nível de usina e construir contrafactuais quantitativos sob cenários de estresse, com interpretação econômica explícita para o nexos clima-energia-financeiras.

O estudo está organizado da seguinte forma. A próxima seção apresenta o referencial teórico sobre risco climático físico e seus canais de transmissão para o setor hidrelétrico e para variáveis econômico-financeiras. Em seguida, descrevem-se os dados, o tratamento das séries e a estratégia metodológica. Depois, são reportados os resultados econométricos sobre a sensibilidade da geração aos fatores climáticos e hidrológicos e, na sequência, os exercícios de estresse. Em etapa central da análise, o estudo quantifica como choques de geração são transmitidos para a receita e discute suas implicações para o risco de crédito por meio do indicador *Revenue-at-Risk* (RaR10). Por fim, apresentam-se as conclusões.

## 2 Referencial Teórico

A discussão a seguir reúne a literatura que fundamenta o argumento do estudo, com foco nos efeitos do risco climático físico sobre sistemas hidro dependentes e em seus canais de transmissão para geração, receita e métricas associadas ao risco econômico-financeiro. O objetivo é situar o estudo na interface entre economia da energia, risco climático e finanças corporativas, destacando evidências sobre seca, variabilidade hidrológica e heterogeneidade de impactos entre usinas e segmentos do setor elétrico.

Evidências recentes ilustram esses mecanismos em diferentes contextos. Adu-Poku et al. (2024), ao analisarem a Bacia do Rio Volta, mostram que déficits recorrentes de umidade mensurados pelo Índice Padronizado de Precipitação–Evapotranspiração (SPEI) aumentam a probabilidade de déficit hidrelétrico e sugerem perdas estruturais sob cenários futuros, reforçando a elevada sensibilidade da geração a anomalias climáticas. Para os Estados Unidos, Moghaddasi et al. (2024) estimam perdas acumuladas expressivas de geração hidrelétrica no período 2003–2020 e discutem efeitos da substituição por térmicas sobre custos e emissões. Complementarmente, Turner et al. (2022), em evidência produzida pelo Laboratório Nacional do Noroeste do Pacífico (PNNL), indicam que, embora o parque agregado exiba alguma resiliência, bacias específicas podem sofrer deterioração substancial de geração sob secas prolongadas, destacando heterogeneidades espaciais relevantes para avaliação de vulnerabilidade.

Além dos impactos operacionais, a literatura recente reforça que secas e choques hidrológicos podem afetar fluxos de caixa e volatilidade de receitas em setores intensivos em recursos naturais, com potenciais efeitos sobre solvência e risco de crédito. No campo de mensuração, o relatório da Iniciativa Financeira do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente em parceria com a Base Global de Dados de Crédito sintetiza evidências de que riscos climáticos físicos podem alterar parâmetros fundamentais de risco de crédito, como probabilidade de inadimplência (PD) e perda dado o default (LGD), e ressalta a baixa padronização metodológica para incorporar variáveis climáticas em modelos quantitativos utilizados por instituições financeiras (UNEP FI, 2025).

Evidências prudenciais recentes fortalecem essa ligação ao quantificar efeitos de eventos físicos compostos sobre inadimplência e perdas esperadas no sistema bancário. Barón et al. (2026) aplicam os cenários climáticos de curto prazo do NGFS ao sistema bancário uruguaio e mostram que choques físicos severos combinando seca, ondas de calor e incêndios florestais elevam a PD setorial, ampliam as perdas

esperadas e podem representar parcela material do capital regulatório em parte das instituições avaliadas. Esses resultados reforçam que choques físicos podem se transmitir ao risco de crédito por meio da deterioração de receitas e ativos, com materialidade mensurável em exercícios de estresse.

No Brasil, o debate combina evidência setorial com diagnósticos de estabilidade financeira. Do ponto de vista macroprudencial, o Banco Central do Brasil (2024) destaca que riscos climáticos físicos podem afetar o risco de crédito ao reduzir capacidade de pagamento e/ou depreciar garantias, com tendência de maior relevância em horizontes longos e com especial atenção a eventos como secas, escassez de recursos naturais e desertificação.

Na literatura corporativa nacional, os resultados permanecem heterogêneos. Polizel e Lana Pinto (2024) encontram evidências de deterioração de indicadores econômico-financeiros associadas a crises hídricas, com maior sensibilidade nos segmentos de geração e, sobretudo, de distribuição, enquanto transmissoras aparentam maior resiliência compatível com estruturas de remuneração por disponibilidade. Em contraste, Pereira e Martins (2022), usando proxies agregadas em frequência anual, reportam baixa significância estatística entre crise hídrica e indicadores financeiros, sugerindo que amortecedores regulatórios e contratuais podem suavizar parte da transmissão no agregado e que ganhos de identificação podem requerer maior granularidade temporal, segmentação e variáveis hidrológicas/climáticas mais diretamente vinculadas à operação.

Apesar dos avanços, persiste uma lacuna central: a literatura de energia tem documentado com maior detalhe o elo clima → hidrologia → geração (e seus efeitos sistêmicos), enquanto a literatura financeira e prudencial avança na mensuração risco climático físico → crédito (PD/LGD, inadimplência e perdas esperadas), mas ainda são raros arcabouços empíricos que conectem esses elos de forma integrada em nível de ativo/empresa e em frequência mensal, permitindo estimar parâmetros interpretáveis e conduzir exercícios de estresse específicos para ativos hidrelétricos. Nesse contexto, a contribuição deste estudo é produzir evidência quantitativa e comparável sobre mecanismos de transmissão de curto e longo prazos, com utilidade direta para avaliação de vulnerabilidade, análise de crédito e desenho de instrumentos de gestão de risco no setor hidrelétrico amazônico.

### 3 Metodologia

Metodologicamente, o estudo combina descrição das variáveis, tratamento das séries e modelagem econométrica para examinar as relações entre exposições climáticas, hidrológicas e ambientais e o desempenho operacional e econômico-financeiro de duas hidrelétricas da Bacia Amazônica, SA e BM. A unidade de observação é mensal, cobrindo abril de 2016 a janeiro de 2025. As séries provêm de fontes oficiais: geração de energia e vazão turbinada do Operador Nacional do Sistema Elétrico; temperatura do ar (SA: Porto Velho; BM: Altamira) da Força Aérea Brasileira; precipitação de estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (SA: 359001, 459000, 459001, 560001, 560002; BM: 153000, 252001, 254010, 254011, 352005); e focos ativos de queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

No modelo ARDL, a variável dependente é a geração de energia (SA: LN\_Energia\_SA\_X13; BM: LN\_Energia\_BM\_X13). As regressoras capturam (i) condições termodinâmicas (LN\_Temperatura\*\_X13), (ii) disponibilidade hídrica por precipitação observada em estações pluviométricas ao longo da bacia — usada como *proxy* do regime de chuvas relevante para a afluência e a geração — (SA:LN\_359001\_SA\_X13, LN\_459000\_SA\_X13, LN\_459001\_SA\_X13, LN\_560001\_SA\_X13, LN\_560002\_SA\_X13; BM: LN\_153000\_BM\_X13, LN\_252001\_BM\_X13, LN\_254010\_BM\_X13, LN\_254011\_BM\_X13, LN\_352005\_BM\_X13) e por operação hidráulica (LN\_Vazao\*\_X13, vazão turbinada), e (iii) estresse ambiental (LN\_Queimadas\*\_X13). Variáveis econômico-financeiras (p.ex., receitas de vendas) são exploradas como desfechos em etapa subsequente da estratégia empírica, preservando a interpretação do ARDL como canal “exposição → geração”.

As variáveis foram transformadas em logaritmos naturais, permitindo interpretar coeficientes como elasticidades e reduzindo assimetrias e heterocedasticidade. Para séries com zeros ou valores muito baixos, aplica-se transformação compatível (p.ex.,  $\log(1 + x)$ ) para evitar indeterminações e preservar comparabilidade.

Para reduzir sazonalidade recorrente e isolar variações associadas a choques climáticos e hidrológicos, as séries mensais em log foram dessazonalizadas com X-13 - ARIMA-SEATS como procedimento principal e replicadas por STL (*Seasonal-Trend decomposition using Loess*) como verificação de robustez (FINDLEY et al., 1998; CLEVELAND et al., 1990). A sazonalidade na série original e a adequação da dessazonalização foram avaliadas pelo teste de Kruskal–Wallis por mês e por diagnósticos de autocorrelação sazonal na defasagem 12, por meio da ACF (12) e

estatística de Ljung–Box  $Q(12)$  (KRUSKAL; WALLIS, 1952; LJUNG; BOX, 1978; BOX et al., 2015; BROCKWELL; DAVIS, 2016). Em ambas as usinas, observou-se forte evidência de sazonalidade no conjunto original (SA:  $p_{KW} \in [2,11 \times 10^{-15}; 3,87 \times 10^{-8}]$ ; BM:  $p_{KW} \in [4,08 \times 10^{-15}; 1,13 \times 10^{-8}]$ ) e ausência de evidência de sazonalidade residual após dessazonalização (SA:  $p_{KW} \in [0,9983; 1,0000]$ ; BM:  $p_{KW} \in [0,6765; 0,999995]$ ), com redução substancial da assinatura anual no diagnóstico em lag 12; a sensibilidade via STL confirmou o mesmo veredito substantivo.

Lacunas eventuais em séries climáticas e hidrológicas foram tratadas por imputação parcimoniosa por meio de filtro de Kalman em estrutura de espaço de estados (KALMAN, 1960; DURBIN; KOOPMAN, 2012), limitada a no máximo 3% das observações por variável, com checagem de estabilidade por estatísticas descritivas antes e depois do ajuste. Os diagnósticos indicam estabilidade praticamente integral em BM (média, desvio-padrão, mínimo e máximo idênticos em todas as estações) e, em SA, ausência de alterações em quatro de cinco estações; na estação 560002 observou-se aumento da média em ~22% e redução do desvio-padrão em ~7,8%, com extremos praticamente inalterados ( $\Delta_{\text{máx}} \approx +0,4\%$ ), sugerindo intervenção localizada e sem distorção do suporte da série. Para controlar choques não recorrentes e possíveis mudanças estruturais no período amostral, incluem-se dummies de regime/quebra especificadas de forma parcimoniosa e por usina, justificadas por evidência empírica e diagnósticos de estabilidade, reduzindo risco de viés na estimação dos efeitos das exposições climáticas, hidrológicas e ambientais.

A estratégia empírica foi estruturada para identificar e quantificar como choques climáticos ambientais e hidrológicos se propagam ao longo donexo clima → hidrologia → geração → risco econômico-financeiro, com implicações para risco de crédito, em nível de usina, utilizando modelos de séries temporais compatíveis com dados mensais e com ênfase na interpretação econômica dos parâmetros estimados.

Como etapa preliminar, avaliou-se a ordem de integração das séries a fim de garantir especificações econometricamente válidas. Aplicaram-se os testes ADF e KPSS, que possuem hipóteses nulas opostas e, quando analisados em conjunto, fornecem uma leitura mais informativa da estacionariedade em amostras finitas (DICKEY; FULLER, 1979; KWIATKOWSKI et al., 1992). Em casos de conflito entre ADF e KPSS no nível, recorreu-se exclusivamente ao teste de Zivot–Andrews, empregado de forma restrita como critério formal de desempate, permitindo verificar se uma quebra estrutural endógena poderia explicar a divergência observada (ZIVOT; ANDREWS, 1992). Esse protocolo é orientado por rastreabilidade: a decisão primária decorre de ADF+KPSS, e

o teste com quebra é acionado apenas quando a evidência é inconsistente, assegurando a ausência de processos  $I(2)$  — condição necessária para a aplicação consistente do modelo ARDL com teste Bounds, conforme PESARAN; SHIN; SMITH (2001)

Confirmada a compatibilidade das séries com o arcabouço ARDL, estimaram-se modelos dinâmicos para avaliar a relação entre variáveis climáticas/hidrológicas e a geração de energia elétrica, distinguindo efeitos de curto e médio prazo por meio da estrutura com defasagens e do mecanismo de correção implícito na dinâmica do modelo. A existência de relação de longo prazo foi investigada exclusivamente pelo teste de Bounds, apropriado para sistemas com variáveis  $I(0)$  e  $I(1)$ , amplamente utilizado na literatura aplicada e adequado ao objetivo de inferência sobre vínculo de longo prazo em modelos ARDL (PESARAN; SHIN; SMITH, 2001).

Em complemento, estimou-se um modelo log-linear de elasticidade receita–geração, no qual a receita de vendas responde às variações da energia gerada. Esse bloco permite avaliar em que medida perdas físicas de produção se traduzem em perdas financeiras, fornecendo uma medida direta de exposição econômico-financeira associada a choques operacionais induzidos pelo clima. As estimações foram realizadas por MQO com erros-padrão robustos à heterocedasticidade (WHITE, 1980), utilizando a correção HC1 como ajuste de amostra finita (MACKINNON; WHITE, 1985).

Com base nos parâmetros estimados, foram conduzidos testes de estresse climático como extensão aplicada do ARDL: simularam-se choques exógenos percentuais em variáveis selecionadas e mensurou-se o efeito esperado sobre a geração (variável dependente) no horizonte-alvo, mantendo os demais regressores constantes, de modo a isolar a sensibilidade parcial da geração a cada estressor. Os cenários foram implementados tanto de forma individual (um choque por vez) quanto em configuração combinada (choques simultâneos), permitindo comparar materialidade e risco composto. Esse desenho é alinhado à lógica de estresse climático baseada em cenários plausíveis e interpretação econômica, conforme diretrizes internacionais de mercado (UNEP FI, 2021). Como o modelo é especificado em log, o impacto simulado foi convertido para variação percentual por meio da transformação exponencial da diferença entre a trajetória estressada e a trajetória base.

A partir dos exercícios de estresse, construiu-se o indicador *Revenue-at-Risk* (RaR10), definido como o impacto percentual sobre a receita associado a uma redução padronizada de 10% na geração, sintetizando a exposição climática-operacional com

relevância direta para o risco econômico-financeiro e sua leitura como proxy de risco de crédito.

Por fim, para capturar mudanças de regime associadas a episódios extremos, a especificação empírica incorpora dummies de regime para os anos de 2017 e 2023, tratadas como controles estruturais de robustez. Essas dummies são motivadas por evidência empírica de quebras endógenas identificadas no protocolo de estacionariedade quando houve conflito ADF×KPSS, e sua inclusão permite avaliar a estabilidade dos coeficientes e a sensibilidade dos resultados do ARDL/estresses à modelagem explícita de mudanças estruturais (ZIVOT; ANDREWS, 1992).

As séries financeiras originalmente trimestrais foram convertidas para frequência mensal pelo método de Denton–Cholette, preservando totais trimestrais e minimizando variações de alta frequência induzidas pela interpolação; a mensalização utilizou a geração mensal de energia como indicador (DENTON, 1971; CHOLETTE, 1984). Para avaliar sensibilidade à escolha do método, aplicaram-se alternativas clássicas de desagregação temporal, Chow–Lin e Fernández (CHOW; LIN, 1971; FERNÁNDEZ, 1981). Os resultados indicam elevada robustez para ambas as usinas: em BM, a série mensal por Chow–Lin é numericamente idêntica à de Denton–Cholette, enquanto Fernández produz trajetórias altamente correlacionadas (correlação >0,99), com diferenças percentuais médias <1% e variância praticamente inalterada; evidência semelhante é observada para SA. Esses achados sugerem que a mensalização não introduz distorções economicamente relevantes quando ancorada em indicador físico observável, legitimando seu uso nas estimações e nos exercícios de estresse subsequentes.

Todas as rotinas de estimação, testes e simulações foram implementadas no software R, e as saídas foram organizadas e consolidadas em planilhas Excel para rastreabilidade e reporte.

#### **4 Resultados Empíricos**

Na etapa empírica, a especificação dos modelos ARDL para SA e BM foi definida por um critério combinado: (i) plausibilidade físico-econômica (hidrologia–operação–geração), (ii) consistência estatística (sinal coerente e relevância ao longo das defasagens) e (iii) blindagem da especificação frente à multicolinearidade, avaliada pelo Variance Inflation Factor (VIF). Esse cuidado é particularmente importante em aplicações hidro climáticas, nas quais é esperado que existam correlações estruturais entre variáveis (p.ex., chuva–vazão; temperatura–evapotranspiração; proxies

meteorológicas entre estações). Assim, o VIF foi adotado como filtro auxiliar (e não como “achado”), reduzindo o risco de instabilidade de coeficientes por variância inflada e aumentando a interpretabilidade econômica, com a devida cautela quanto a regras mecânicas de corte para VIF (O'BRIEN, 2007).

Na prática, os VIFs do modelo permaneceram baixos o que reforça que a inferência não está dominada por colinearidade entre regressoras — condição relevante para a leitura de elasticidades e, principalmente, para a credibilidade das simulações contrafactuais por choque (estresse) desenvolvidas nas seções seguintes.

Quanto as propriedades das séries e adequação ao ARDL, a triagem de estacionariedade das variáveis no modelo indica comportamento compatível com  $I(0)$  para ambas as usinas. Em situações de divergência entre ADF e KPSS no nível, aplicou-se Zivot–Andrews apenas como regra formal de desempate. Para controlar mudanças de regime e padronizar a especificação entre usinas, os modelos incluem dummies de regime  $D_{2017}$  ( $\geq 01-02-2017$ ) e  $D_{2023}$  ( $\geq 01-06-2023$ ), aplicadas em SA e BM.

Do ponto de vista metodológico, esse desenho é central para a estratégia ARDL/Bounds por dois motivos: (i) preserva a validade do arcabouço ao descartar a presença de processos  $I(2)$  na etapa de triagem; e (ii) sustenta o uso do ARDL para modelar relações dinâmicas em níveis e defasagens, com estabilidade avaliada por checagens específicas. Em particular, com séries predominantemente  $I(0)$ , a leitura do Bounds deve ser feita com a qualificação apropriada evitando tratar o teste como evidência automática de cointegração no sentido clássico entre séries  $I(1)$ .

No que se refere à cointegração, os testes de limites (Bounds) indicam evidência estatística de relação persistente em níveis para ambas as usinas sob o Case 2 (constante, sem tendência), opção compatível com a especificação parcimoniosa em séries em log/dessazonalizadas e com controles de regime via dummies: SA apresenta  $F = 4,30$  ( $p = 0,0114$ ) e BM apresenta  $F = 6,82$  ( $p = 0,0008$ ). Esses resultados sugerem que os termos em nível defasados são conjuntamente relevantes no arcabouço ARDL, isto é, há evidência de uma componente em níveis estatisticamente informativa no mecanismo dinâmico do modelo.

É, contudo, necessário qualificar essa leitura à luz do veredito de estacionariedade adotado neste estudo. Quando as séries são predominantemente  $I(0)$ , o Bounds não deve ser interpretado como evidência de “cointegração no sentido clássico” — tradicionalmente associado a combinações estacionárias entre variáveis  $I(1)$  —, mas, de forma mais estrita, como um teste de significância conjunta dos termos em níveis defasados. Assim, o foco recai menos sobre cointegração e mais sobre a identificação

de um vínculo persistente capturado pelo mecanismo dinâmico do ARDL, mantida a condição padrão de inexistência de séries  $I(2)$ . Em consonância com essa qualificação, o estudo prioriza inferência substantiva via efeitos de curto prazo, tratando medidas de “longo prazo” com maior parcimônia e sem atribuir a elas a leitura de equilíbrio de cointegração.

Do ponto de vista substantivo, essa interpretação permanece consistente com a natureza do sistema hidrelétrico: choques hidro climáticos (temperatura, precipitação, vazão e proxies correlatas) e decisões operacionais afetam a geração com defasagens e persistência, refletindo restrições físicas, armazenamento/regularização, regras de despacho e ajustes graduais. Logo, mesmo na presença de séries estacionárias, é plausível que o modelo identifique uma estrutura dinâmica em que os níveis defasados carregam informação relevante sobre o comportamento de médio prazo.

Dessa forma, no presente estudo, o Bounds é tratado como evidência complementar de vínculo persistente, a ser lida em conjunto com (i) os diagnósticos de resíduos e (ii) a estabilidade paramétrica. Em conjunto, esses elementos sustentam a validade empírica do modelo ARDL estimado — com controles de quebras via dummies em degrau — e fundamentam as simulações contrafactuais por estresse apresentadas adiante.

Na estimação do ARDL para SA, o modelo em nível apresenta bom ajuste amostral ( $R^2 = 0,703$ ;  $R^2_{aj} = 0,647$ ) e resultados estáveis quando a inferência é conduzida com erros robustos HC1. Observa-se persistência da geração via defasagem de energia ( $\beta = 0,589$ ;  $p < 0,001$ ) e um canal hidrológico de curto prazo via vazão, com efeito contemporâneo positivo ( $\beta = 0,439$ ;  $p < 0,001$ ) e compensação parcial no mês subsequente ( $\beta = -0,285$ ;  $p = 0,016$ ), de modo que o efeito líquido de curtíssimo prazo permanece positivo ( $\beta_{liq} = +0,154$ ). Adicionalmente, identifica-se associação contemporânea negativa entre temperatura e geração ( $\beta = -2,627$ ;  $p < 0,001$ ). Entre as proxies meteorológicas, LN\_359001SA\_X13 apresenta efeito significativo em defasagens mais longas (3–4 meses), com sinais alternados e efeito líquido próximo de zero ( $\beta_{liq} \approx +0,007$ ), sugerindo dinâmica de ajuste mais do que um efeito líquido monotônico.

Na estimação do ARDL para BM, o modelo em níveis apresenta elevado ajuste amostral ( $R^2 = 0,895$ ;  $R^2_{aj} = 0,883$ ) e resultados estáveis quando a inferência é conduzida com erros robustos HC1. Observa-se persistência da geração via defasagem de energia ( $\beta = 0,641$ ;  $p < 0,001$ ) e um canal hidrológico de curto prazo via vazão, com efeito contemporâneo positivo ( $\beta = 0,790$ ;  $p < 0,001$ ) e compensação parcial no mês subsequente ( $\beta = -0,476$ ;  $p = 0,006$ ), de modo que o efeito líquido de curtíssimo prazo

permanece positivo ( $\beta_{liq} = +0,314$ ). Em contraste com SA, termos meteorológicos/proxies adicionais sugeridos pelo *summary* não robusto não se mantêm a 5% sob HC1, reforçando uma leitura conservadora em que a dinâmica de BM é explicada principalmente por inércia e disponibilidade hídrica.

Em síntese, SA inclui temperatura como driver robusto, além de vazão e persistência, e apresenta evidência de efeitos defasados em uma proxy meteorológica (com sinais alternados). BM, por sua vez, exibe um núcleo mais “enxuto”, dominado por vazão e persistência, com maior magnitude do canal hidrológico de curtíssimo prazo ( $\beta_{liq} = +0,314$  vs.  $+0,154$  em SA), reforçando a leitura de que a disponibilidade hídrica é o principal mecanismo contemporâneo sob inferência conservadora (HC1).

Como evidência adicional de precedência temporal no curto prazo, os testes de causalidade de Granger, estimados com quatro defasagens, sugerem:

SA: rejeição da hipótese nula (há Granger) para LN\_359001SA\_X13 ( $p = 0,00007$ ) e LN\_560002SA\_X13 ( $p = 0,01667$ ) sobre energia. Em contraste, temperatura ( $p = 0,27179$ ) e vazão ( $p = 0,23724$ ) não rejeitam a hipótese nula, sugerindo que parte da informação relevante pode estar sendo capturada por proxies meteorológicas locais e/ou pelas defasagens internas do ARDL.

BM: rejeição da hipótese nula para LN\_153000BM\_X13 ( $p = 0,00289$ ) sobre energia; vazão não rejeita a hipótese nula ( $p = 0,99710$ ) nesta ordem.

Essa leitura é compatível com a interpretação físico-econômica de que medidas meteorológicas locais podem antecipar variações operacionais na geração, enquanto a vazão — embora central na física do processo — pode ter sua precedência temporal parcialmente absorvida (i) pela dinâmica interna do ARDL e/ou (ii) pela coevolução operacional entre vazão e geração (regras de despacho, restrições de operação e ajustes endógenos do sistema).

No que se refere aos diagnósticos de resíduos e implicações para robustez inferencial os resultados indicam:

SA

- Durbin–Watson:  $p = 0,34494$  (sem evidência de autocorrelação).
- Breusch–Godfrey:  $p = 0,83258$  (sem evidência de autocorrelação até a defasagem 4).
- Breusch–Pagan:  $p = 0,04423$  (evidência de heterocedasticidade).

- Jarque–Bera:  $p = 0,03888$  (normalidade rejeitada).

Os testes de diagnóstico do modelo ARDL indicam ausência de autocorrelação serial dos resíduos, o que é consistente com uma especificação dinâmica adequada para a amostra mensal ( $T = 106$ ). Em contrapartida, rejeitam-se a homocedasticidade e a normalidade dos resíduos, recomendando cautela na inferência baseada no modelo clássico com variância constante. Assim, os resultados são reportados tanto sob a forma clássica quanto com erros-padrão robustos do tipo HC1, mitigando vieses de inferência decorrentes de heterocedasticidade e conferindo maior confiabilidade aos testes de significância dos parâmetros.

## BM

- Durbin–Watson:  $p = 0,14898$  (sem evidência de autocorrelação).
- Breusch–Godfrey:  $p = 0,17197$  (sem evidência de autocorrelação até a defasagem 4).
- Breusch–Pagan:  $p = 0,00045$  (evidência de heterocedasticidade).
- Jarque–Bera:  $p = 0$  (normalidade rejeitada).

Os testes de diagnóstico do modelo ARDL indicam ausência de autocorrelação serial dos resíduos o que é consistente com uma especificação dinâmica adequada para a amostra mensal ( $T = 106$ ). Em contrapartida, rejeitam-se fortemente a homocedasticidade e a normalidade dos resíduos recomendando cautela na inferência baseada no modelo clássico com variância constante. Assim, os resultados são reportados tanto sob a forma clássica quanto com erros-padrão robustos do tipo HC1, mitigando vieses de inferência decorrentes de heterocedasticidade e conferindo maior confiabilidade aos testes de significância dos parâmetros

Quanto a multicolinearidade (VIF) nos modelos, os fatores de inflação da variância do ARDL para SA sugerem multicolinearidade baixa a moderada, com valores entre 1,52 (D\_2017) e 4,73 (D\_2023). Os maiores VIFs concentram-se nos blocos defasados e no termo autorregressivo (por exemplo,  $L(LN\_Energia\_SA\_X13,1:3) = 3,49$ ,  $L(LN\_Temperatura\_SA\_X13,0:1) = 4,27$  e  $L(LN\_359001SA\_X13,0:4) = 4,21$ ), padrão esperado em especificações dinâmicas. Esse resultado não indica colinearidade severa, sugerindo efeito predominantemente sobre a precisão (erros-padrão) de regressoras mais correlacionadas, sem comprometer a estabilidade geral da estimação.

Os fatores de inflação da variância (VIF) do ARDL para BM sugerem multicolinearidade mais elevada e concentrada, com valores entre 1,10 ( $L(LN\_153000BM\_X13,0:1)$ ) e 6,50

(L(LN\_Energia\_BM\_X13,1)). Os maiores VIFs concentram-se no termo autorregressivo e no bloco de vazão (L(LN\_Energia\_BM\_X13,1:1) = 6,50; L(LN\_Vazao\_X13,0:1) = 5,45), enquanto as demais regressoras e dummies permanecem com VIFs baixos (D\_2017 = 1,87; D\_2023 = 1,14). Esse resultado não indica colinearidade severa generalizada, sugerindo efeito predominantemente sobre a precisão (erros-padrão) desses termos específicos, preservando a estabilidade geral da estimação.

Em termos práticos, os VIFs indicam que não há multicolinearidade severa generalizada nos modelos finais: em SA predomina um padrão baixo a moderado, enquanto em BM a colinearidade é mais elevada, porém concentrada no termo autorregressivo e no bloco de vazão, sem comprometer o conjunto como um todo. Ainda assim, o VIF é mantido e reportado como blindagem metodológica (filtro auxiliar), pois documenta que a especificação foi checada contra um risco recorrente em variáveis hidroclimáticas e reforça a credibilidade da interpretação econômica dos coeficientes e das simulações de estresse, que dependem da estabilidade interpretativa do conjunto de regressoras.

Quanto a estabilidade paramétrica (CUSUM) e ao diagnóstico por usina, os resultados para SA são consistentes: tanto o CUSUM recursivo quanto o CUSUM baseado em OLS não rejeitam a hipótese de estabilidade paramétrica ao nível de 5% (Rec: S = 0,702; p = 0,246; OLS: S0 = 0,723; p = 0,673), sugerindo ausência de evidência de instabilidade ao longo da amostra, em linha com a tradição de Brown, Durbin e Evans (1975) e com a extensão proposta por Ploberger e Kramer (1992). Substantivamente, esse resultado é compatível com a interpretação de que a especificação estimada permanece estável de forma ampla, sem sinais de ruptura relevante capazes de comprometer a trajetória do ajuste. Assim, no texto final, SA é reportada como caso de estabilidade paramétrica, sem ressalvas adicionais além das checagens usuais de robustez.

Para BM o diagnóstico é misto: o CUSUM recursivo rejeita a hipótese de estabilidade paramétrica ao nível de 5% (Rec: S = 0,961; p = 0,045), sugerindo instabilidade possivelmente localizada e sensibilidade à recursividade do ajuste, enquanto o CUSUM baseado em OLS não rejeita estabilidade de forma ampla (OLS: S0 = 0,634; p = 0,817). Substantivamente, esse padrão é compatível com a indicação diagnóstica de quebra em energia em 2023-10-01 e com a hipótese de mudança de regime no pós-2023 afetando a trajetória recursiva, sem necessariamente implicar instabilidade global ao longo de toda a amostra. Assim, no texto final, BM é reportada com ressalva metodológica: não deve ser apresentada como estabilidade plena, embora o diagnóstico também não sustente instabilidade generalizada.

Em síntese comparativa, os resultados empíricos indicam que SA e BM exibem evidência de vínculo persistente em nível no arcabouço ARDL (Bounds sob Case 2), com a qualificação apropriada dado o predomínio de séries I(0), e sinais de precedência temporal de curto prazo via Granger para proxies meteorológicas específicas.

As diferenças centrais entre usinas são: (i) em SA, embora não haja evidência de autocorrelação serial (DW/BG), observa-se heterocedasticidade e não-normalidade em intensidade moderada, o que sustenta a priorização de erros-padrão robustos (HC1), com estabilidade paramétrica confirmada de forma consistente pelos testes CUSUM; (ii) em BM, também não há evidência de autocorrelação (DW/BG), mas os desvios de homocedasticidade e normalidade são mais pronunciados, reforçando ainda mais a blindagem inferencial via HC1 e a leitura cautelosa do modelo clássico, além de uma ressalva honesta de estabilidade recursiva: o CUSUM Rec sugere instabilidade possivelmente localizada, enquanto o CUSUM OLS não aponta instabilidade ampla, padrão compatível com hipótese de mudança de regime no pós-2023 sem implicar ruptura generalizada dos parâmetros.

Essas evidências preparam diretamente o passo seguinte do estudo: quantificar implicações contrafactuais relevantes para risco por meio de simulações de estresse (choques climáticos/hidrológicos), traduzindo os achados estatísticos desta seção em métricas interpretáveis sob a ótica operacional e de risco.

## **5 Testes de Estresse Hidro climáticos e implicações operacionais**

No que se refere aos testes de estresse hidro climático e implicações operacionais, esta parte traduz os achados estatísticos da etapa anterior em métricas contrafactuais diretamente interpretáveis sob a ótica operacional e de risco: quanto a geração estimada mudaria caso choques hidro climáticos plausíveis ocorressem, *ceteris paribus*. O objetivo não é prever eventos extremos, mas quantificar sensibilidades e ordens de grandeza do impacto sobre a geração a partir da dinâmica estimada no modelo ARDL de referência para cada usina, definidos após triagem parcimoniosa de regressoras, com filtro de multicolinearidade e checagens de adequação do ajuste como salvaguardas empíricas.

Os testes de estresse aplicam choques padronizados de  $\pm 10\%$  (sinal conforme a variável) para assegurar comparabilidade entre usinas e canais de exposição e para reportar resultados como sensibilidades contrafactuais condicionais ao modelo. A implementação é *ceteris paribus* (demais regressoras e dummies mantidas no baseline) para isolar o efeito marginal de cada exposição no domínio estimado, em linha com a

prática de análise de cenários e *stress testing*, que utiliza cenários harmonizados como contrafactuais de referência para comparação e comunicação — e não como previsão probabilística de extremos. (NGFS, 2025; BCBS, 2024).

Quanto ao desenho dos cenários, à janela de simulação e à métrica de impacto os testes de estresse seguem um desenho contrafactual padronizado para as duas usinas: aplica-se um choque exógeno (positivo ou negativo) a uma regressora climática/hidrológica específica e reestima-se a trajetória prevista da geração mantendo o restante do sistema como observado. A comparação entre a trajetória base e a trajetória sob estresse produz, mês a mês, a diferença e o impacto percentual na geração, permitindo consolidar estatísticas de resumo (média, mínimo e máximo) no horizonte de simulação.

A janela usada nas simulações compreende 2022–2024, garantindo comparabilidade interna entre cenários e consistência com a leitura de possível mudança de regime no período recente. Em termos de reporte, esta seção se ancora em duas saídas centrais da planilha de resultados:

- Aba *Stress\_Semaforo*: consolida, por cenário, o impacto médio e a classificação qualitativa (“semáforo”) da severidade do choque (bem como mínimos e máximos no período).
- Aba *StressComb\_Top3*: reporta a trajetória mensal do cenário combinado Top-3, isto é, uma simulação conjunta envolvendo múltiplas regressoras relevantes no modelo final conforme o critério interno de seleção adotado no pipeline.
- O critério interno segue a seguinte métrica: impactos médios  $\leq -5\%$  são classificados como Alto (●); entre  $(-5\%, -2\%]$  como Moderado (●); entre  $(-2\%, 0)$  como Leve (●); e valores  $\geq 0$  como Leve (ganho) (●).

A classificação qualitativa (‘semáforo’) usa bandas de severidade definidas ex ante para triagem, comparabilidade e comunicação dos resultados. Essa escolha é consistente com a prática de *scenario analysis/stress testing*, que reporta impactos por ordem de grandeza com foco em materialidade, evitando falsa precisão e facilitando a interpretação por tomadores de decisão (NGFS, 2025; BCBS, 2024; BANK OF ENGLAND, 2024). As bandas são tratadas como critério interno transparente, alinhado a metodologias que admitem limiares para reporte e recomendam o estabelecimento de *thresholds* quantitativos/qualitativos de severidade (EBA, 2023; EFRAG, 2023).

Nos testes de estresse individuais para SA, os resultados sugerem uma assimetria clara no recorte 2022–2024: o choque de temperatura produz impacto substancialmente

superior aos choques isolados de vazão e das estações meteorológicas. Os cenários individuais resumem-se em:

Tabela 1 – Estresses Individuais – SA

Variável	Choque	Impacto médio	Classificação
Vazão	-10%	-1,61%	Leve (queda)
Temperatura	10%	-13,11%	Alto (queda)
LN_560002_SA_X13	-10%	-0,43%	Leve (queda)
LN_359001_SA_X13	-10%	0,36%	Leve (ganho)

Fonte: elaborado pelo autor

Do ponto de vista substantivo, o resultado central não é a direção isolada de uma estação específica, mas o contraste de magnitudes: a sensibilidade estimada à temperatura domina a leitura contrafactual em SA no horizonte analisado, gerando quedas de dois dígitos mesmo sob choque padronizado. Por sua vez, impactos pequenos — ou mesmo com sinal positivo em séries de estações meteorológicas específicas — são compatíveis com a natureza condicional e dinâmica do ARDL: refletem efeitos marginais líquidos dada a especificação, a estrutura de defasagens e as correlações entre regressoras, e não um mecanismo físico isolado.

No estresse combinado Top-3 para SA os resultados sugerem que, quando choques climaticamente relevantes atuam de forma simultânea, o impacto contrafactual não apenas aumenta em magnitude, como se mantém elevado e persistente ao longo de todo o horizonte analisado (2022–2024). O cenário combinado Top-3 para SA resume-se em:

Tabela 2 – Estresse Combinado – SA

Variável	Choque	Impacto médio	Classificação
Vazão +	-10%		
Temperatura +	10%	-14,20%	Alto (queda)
LN_359001_SA_X13	-10%		

Fonte: elaborado pelo autor

A composição do cenário é confirmada na aba de validação do combinado (*StressComb\_Valid*), que indica a combinação Temperatura (+10%) + Vazão (-10%) + Estação meteorológica LN\_359001SA\_X13 (-10%).

Do ponto de vista substantivo, o resultado central não é a direção isolada de um componente específico, mas o contraste de magnitudes em relação aos estresses individuais: a atuação conjunta de temperatura, vazão e uma estação meteorológica

eleva a perda estimada para um patamar de dois dígitos e a mantém estável ao longo do período simulado. Em termos de risco, esse comportamento é especialmente relevante porque aproxima o exercício de estresse de situações plausíveis de comovimento climático-hidrológico (por exemplo, ambiente mais quente combinado a restrições hidrológicas), elevando a utilidade do contrafactual como métrica operacional.

Nos testes de estresse individuais para BM os resultados sugerem sensibilidade mais moderada no recorte 2022–2024, com heterogeneidade entre vazão e as variáveis meteorológicas. Os cenários individuais reportados resumem-se em:

Tabela 3 – Estresses Individuais – BM

Variável	Choque	Impacto médio	Classificação
Vazão	-10%	-3,26%	Moderado (queda)
LN_153000_BM_X13	-10%	-0,90%	Leve (queda)
LN_254010_BM_X13	-10%	0,66%	Leve (ganho)
LN_254011_BM_X13	-10%	0,13%	Leve (ganho)
LN_252001_BM_X13	-10%	-0,29%	Leve (queda)

Fonte: elaborado pelo autor

Do ponto de vista substantivo, o resultado central não é a direção isolada de uma variável meteorológica específica, mas o contraste de magnitudes: em BM, a vazão aparece como o canal mais relevante no contrafactual simples (queda na ordem de poucos pontos percentuais), enquanto as variáveis meteorológicas exibem efeitos pequenos (inclusive com sinal positivo em alguns casos) no horizonte considerado. Essa leitura deve ser feita em coerência com o diagnóstico previamente reportado: embora os resíduos em BM sejam, em geral, bem-comportados, a estabilidade paramétrica apresentou diagnóstico misto, o que recomenda interpretar os resultados como evidência contrafactual informativa condicional ao modelo estimado e à amostra, e não como estabilidade plena do mecanismo ao longo de toda a janela.

No estresse combinado Top-3 para BM os resultados sugerem que, quando choques hidrológicos e meteorológicos atuam de forma simultânea, o impacto contrafactual combinado tende a se manter persistente e uniforme ao longo do horizonte analisado (2022–2024). O cenário combinado Top-3 para BM resume-se em:

Tabela 4 – Estresse Combinado – BM

Variável	Choque	Impacto médio	Classificação
Vazão +	-10%		
LN_153000_BM_X13 +	-10%	-3,49%	Moderado (queda)
LN_254010_BM_X13	-10%		

Fonte: elaborado pelo autor

A composição do cenário é confirmada na aba de validação do combinado (*StressComb\_Valid*), que indica a combinação Vazão (-10%) + Estação meteorológica LN\_153000BM\_X13 (-10%) + Estação meteorológica LN\_254010BM\_X13 (-10%), caracterizando o conjunto Top-3 com três componentes.

Do ponto de vista substantivo, o resultado central não é a direção isolada de uma variável específica, mas o padrão temporal do contrafactual: sob co-movimento adverso (restrição hidrológica combinada a choques em estações meteorológicas), a geração simulada cai para um novo patamar e permanece nele de forma estável ao longo do período simulado. Em termos operacionais, essa propriedade é relevante porque descreve uma perda persistente (menos “picos episódicos” e mais deslocamento de nível), aproximando o exercício de estresse de condições plausíveis de estresse hidroclimático conjunto e fornecendo uma métrica direta (percentual) para discutir materialidade e exposição na geração.

Em síntese comparativa os testes de estresse reforçam duas mensagens principais. Primeiro, SA apresenta maior sensibilidade a choques padronizados no recorte 2022–2024, especialmente quando o choque envolve temperatura e quando choques atuam conjuntamente, resultando em perdas estimadas persistentes e de alta magnitude. Segundo, BM exhibe impactos contrafactuais menores no exercício individual, com a vazão como canal mais relevante, e, no cenário combinado Top-3, uma perda moderada e uniforme ao longo do período simulado.

Com isso, podemos avançar para a seção seguinte, constatação de sensibilidade para a discussão de implicações de risco: como traduzir diferenças percentuais de geração em leitura operacional (pressão sobre despacho e operação) e em leitura econômico-financeira (pressão sobre receita, necessidade de recomposição/compra e métricas de vulnerabilidade sob estresse), mantendo coerência com os diagnósticos e ressalvas reportados na no item anterior.

## 6 Transmissão de choques de energia para receita e implicações para o risco de crédito (RaR10)

Nesta etapa central do estudo, quantifica-se a vulnerabilidade da receita a um choque exógeno de geração por meio da construção de um indicador de Receita em Risco para uma queda de 10% na energia (RaR10), obtido a partir da elasticidade estimada de  $\ln(\text{Receita})$  em relação a  $\ln(\text{Energia})$  em especificações com correção HAC no sentido de Newey-West e controles sazonais e de regime (NEWKEY; WEST, 1987). O objetivo não é prever trajetórias, mas mensurar a sensibilidade e a ordem de grandeza do canal geração → receita, que constitui a principal via pela qual choques climáticos na produção podem se converter em materialidade financeira e pressionar métricas de crédito, como capacidade de geração de caixa, cobertura do serviço da dívida e buffers de liquidez.

Os resultados indicam heterogeneidade relevante entre usinas expostas ao mesmo pano de fundo climático amazônico, consistente com a hipótese de que a transmissão do choque físico para o caixa depende da arquitetura contratual e da gestão de risco. Para BM, a elasticidade receita–energia estimada com HAC é positiva e estatisticamente sustentada ( $\beta \approx 0,27$ ;  $p < 0,01$ ), implicando  $\text{RaR10} \approx 2,8\%$ : uma queda de geração tende, em média, a se traduzir em perda de receita, sugerindo maior exposição do fluxo operacional à quantidade gerada. Em contraste, para SA, a evidência do canal quantidade→receita é fraca/não robusta ( $\beta \approx -0,08$ ;  $p \approx 0,08$ ) e o ponto estimado sugere que variações de quantidade podem ser parcialmente amortecidas por mecanismos de precificação e comercialização. De forma consistente com essa interpretação, a receita em SA responde de maneira mais clara ao componente de “preço implícito” (proxy ex-ante) nas especificações HAC (coeficiente positivo e estatisticamente significativo), enquanto esse canal não se mostra estatisticamente relevante em BM. Assim, mesmo sob choques comparáveis na geração, os perfis de risco diferem: BM apresenta maior sensibilidade de receita a variações de energia, ao passo que SA aparenta maior capacidade de absorção por meio de precificação/arranjos de comercialização e/ou estratégias de hedge.

Essa leitura é coerente com evidência externa de risco de crédito: as classificações da Fitch Ratings (2024–2025) mantêm SA em ‘AAA(bra)’ e BM em ‘AA–(bra)’, compatível com maior resiliência relativa de SA e maior vulnerabilidade relativa de BM no canal operacional considerado. Ressalta-se, contudo, que ratings agregam dimensões além do mecanismo estimado neste estudo (por exemplo, estrutura de capital, governança, liquidez e garantias); por isso, a comparação com ratings é empregada como validação de plausibilidade externa, não como teste causal.

Em conjunto, esses resultados indicam que o risco climático não se converte automaticamente em risco de crédito na mesma magnitude para todas as hidrelétricas: a transmissão do choque de geração para a receita também é condicionada pela arquitetura de comercialização, mecanismos de precificação e gestão de risco.

## 7 Conclusão

Este estudo mostra que choques hidro climáticos relevantes para o contexto de seca na Amazônia afetam de forma sistemática a geração de energia em duas grandes hidrelétricas — SA e BM — e que essa transmissão não ocorre de maneira homogênea entre usinas expostas ao mesmo pano de fundo climático regional. Os resultados indicam que o canal físico de risco (hidroclima → geração) apresenta intensidade e composição distintas entre usinas, produzindo perfis diferenciados de vulnerabilidade operacional.

Essa heterogeneidade é central para a interpretação econômica dos achados. A evidência sugere que a exposição a um mesmo ambiente climático não implica, por si só, impactos equivalentes sobre desempenho e risco. Os mecanismos dominantes de transmissão, a sensibilidade da geração e a resposta aos cenários de estresse diferem entre as usinas, refletindo características operacionais, estruturais e institucionais específicas.

A principal contribuição do estudo para a área de finanças está em mostrar que a sensibilidade climática só adquire pleno significado econômico quando traduzida em materialidade financeira. O estudo não se limita a documentar efeitos hidro climáticos sobre a geração: ele oferece uma ponte empiricamente estimável entre exposição física, desempenho operacional e vulnerabilidade financeira em nível de firma. Ao converter contrafactuais de geração em elasticidades receita–energia e no indicador *Revenue-at-Risk* (RaR10), o estudo explicita como choques de seca podem se transformar em perdas potenciais de receita e, por essa via, em implicações para solvência e risco de crédito.

Nessa dimensão, os resultados apontam heterogeneidade relevante entre SA e BM. Em BM, o canal geração → receita mostra-se mais sensível, sugerindo maior exposição do fluxo operacional à quantidade produzida. Em SA, por outro lado, a evidência indica maior capacidade relativa de amortecimento, compatível com mecanismos de precificação, comercialização e gestão de risco capazes de reduzir a transmissão imediata do choque físico para o caixa. Assim, o estudo mostra que o risco climático

não se converte automaticamente, nem na mesma magnitude, em risco econômico-financeiro e de crédito.

À luz do problema de pesquisa, a evidência reunida permite concluir que choques climáticos e hidrológicos afetam a geração hidrelétrica de forma persistente e heterogênea e que a passagem dessas perdas físicas para a esfera financeira também depende da arquitetura contratual, dos mecanismos de hedge, da alocação de riscos e da capacidade de gestão de cada usina. Em consequência, firmas sujeitas ao mesmo ambiente climático podem apresentar diferentes graus de vulnerabilidade em termos de receita e risco.

Do ponto de vista aplicado, os achados reforçam a utilidade de incorporar elasticidades operacionais e métricas como o *Revenue-at-Risk* em exercícios de análise de crédito, *stress testing* e gestão de risco corporativo no setor elétrico. Embora os resultados não sejam extrapoláveis para todo o parque hidrelétrico brasileiro, o estudo oferece evidência comparável e economicamente interpretável sobre como choques climáticos físicos podem repercutir sobre geração, receita e risco, contribuindo para a agenda de finanças climáticas e para o aprimoramento de práticas prudenciais e de gestão em infraestrutura intensiva em recursos naturais.

## Referências

ADU-POKU, Akwasi *et al.* Impact of drought on hydropower generation in the Volta River basin and future projections under different climate and development pathways. *Energy and Climate Change*, [S. l.], v. 5, p. 100169, 2024. DOI: 10.1016/j.egycc.2024.100169.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Report on Social, Environmental and Climate-related Risks and Opportunities*. Brasília: Banco Central do Brasil, 2023. v. 3.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Relatório de Estabilidade Financeira: novembro de 2024*. Brasília: Banco Central do Brasil, 2024.

BANK OF ENGLAND. *Measuring climate-related financial risks using scenario analysis*. London: Bank of England, 2024.

BASEL COMMITTEE ON BANKING SUPERVISION. *The role of climate scenario analysis in strengthening the management and supervision of climate-related financial risks*. Basel: Bank for International Settlements, 2024.

BARÓN, Andrea; DASSATTI, Cecilia; LAVAGNA, Gabriela; MONTAÑEZ-ENRÍQUEZ, Ricardo. Assessing climate risks in Uruguay's banks using NGFS short-term scenarios. *Latin American Journal of Central Banking*, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 100198, 2026.

BOX, George E. P. *et al. Time series analysis: forecasting and control*. 5. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

BRASIL. *First Biennial Transparency Report of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024.

BROCKWELL, Peter J.; DAVIS, Richard A. *Introduction to time series and forecasting*. 3. ed. Cham: Springer, 2016.

BROWN, R. L.; DURBIN, J.; EVANS, J. M. Techniques for testing the constancy of regression relationships over time. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 149-163, 1975.

CHOLETTE, Pierre A. Adjusting sub-annual series to yearly benchmarks. *Survey Methodology*, [S. l.], v. 10, p. 35-49, 1984.

CHOW, Gregory C.; LIN, An-loh. Best linear unbiased interpolation, distribution, and extrapolation of time series by related series. *The Review of Economics and Statistics*, [S. l.], v. 53, n. 4, p. 372-375, 1971. DOI: 10.2307/1928739.

CLEVELAND, R. B. *et al.* STL: a seasonal-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 3-73, 1990.

DENTON, Frank T. Adjustment of monthly or quarterly series to annual totals: an approach based on quadratic minimization. *Journal of the American Statistical Association*, [S. l.], v. 66, n. 333, p. 99-102, 1971. DOI: 10.1080/01621459.1971.10482227.

DICKEY, David A.; FULLER, Wayne A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, [S. l.], v. 74, n. 366, p. 427-431, 1979.

DURBIN, James; KOOPMAN, Siem Jan. *Time series analysis by state space methods*. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Hidreletricidade e mudanças climáticas (Fact Sheet)*. Brasília: EPE, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2025*. Brasília: EPE, 2025.

ESPINOZA, J. C. *et al.* The hydroclimatic extremes of the Amazon basin during the last decades. *Climate Dynamics*, [S. l.], v. 62, p. 1-20, 2024. DOI: 10.1007/s00382-023-07062-0.

EUROPEAN BANKING AUTHORITY. *2023 EU-wide stress test - Methodological Note*. Paris: EBA, 2023.

EUROPEAN FINANCIAL REPORTING ADVISORY GROUP. *Implementation Guidance for the Materiality Assessment*. Brussels: EFRAG, 2023.

FERNÁNDEZ, Roque B. A methodological note on the estimation of time series. *The Review of Economics and Statistics*, [S. l.], v. 63, n. 3, p. 471-476, 1981. DOI: 10.2307/1924371.

FINDLEY, David F. *et al.* New capabilities and methods of the X-12-ARIMA seasonal-adjustment program. *Journal of Business & Economic Statistics*, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 127-152, 1998.

FITCH RATINGS. Fitch reafirma rating da 1ª emissão de debêntures da Santo Antônio Energia (SAESA) em 'AAA(bra)'; perspectiva estável. Rio de Janeiro: Fitch Ratings, 28 jan. 2025.

FITCH RATINGS. Fitch reafirma rating da 2ª emissão de debêntures da Belo Monte Energia S.A. em 'AA-(bra)'; perspectiva estável. Rio de Janeiro: Fitch Ratings, 30 jan. 2025.

HAMILTON, James D.; *et al.* 2020. *Climate change and credit risk*. ERI Working Paper. London: Long Finance.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA, 2021.

KALMAN, Rudolf E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, [S. l.], v. 82, n. 1, p. 35-45, 1960.

KOTZ, Maximilian; WENZ, Leonie; LEVERMANN, Anders. Weather extremes and economic damages. *Nature Climate Change*, [S. l.], v. 12, p. 740-746, 2022. DOI: 10.1038/s41558-022-01370-4.

KRUSKAL, William H.; WALLIS, W. Allen. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, [S. l.], v. 47, n. 260, p. 583-621, 1952.

KWIATKOWSKI, Denis *et al.* Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*, [S. l.], v. 54, n. 1-3, p. 159-178, 1992.

LJUNG, Greta M.; BOX, George E. P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, [S. l.], v. 65, n. 2, p. 297-303, 1978.

MACKINNON, James G.; WHITE, Halbert. Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics*, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 305-325, 1985.

MOGHADDASI, Pouya *et al.* Unraveling the hydropower vulnerability to drought in the United States. *Environmental Research Letters*, [S. l.], v. 19, n. 8, p. 084038, 2024. DOI: 10.1088/1748-9326/ad6200.

NETWORK FOR GREENING THE FINANCIAL SYSTEM. *NGFS Scenarios for Central Banks and Supervisors*. Paris: NGFS, 2022.

NETWORK FOR GREENING THE FINANCIAL SYSTEM. *Guide to Climate Scenario Analysis for Central Banks and Supervisors - Update*. Paris: NGFS, 2025.

NEWKEY, Whitney K.; WEST, Kenneth D. A simple, positive semi-definite, heteroskedasticity and autocorrelation consistent covariance matrix. *Econometrica*, [S. l.], v. 55, n. 3, p. 703-708, 1987.

O'BRIEN, R. M. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Quality & Quantity*, [S. l.], v. 41, n. 5, p. 673-690, 2007. DOI: 10.1007/s11135-006-9018-6.

PEREIRA, Eduardo Romani Ross; MARTINS, Marco Antônio dos Santos. O impacto das crises hídricas na rentabilidade e endividamento do setor de energia elétrica de empresas listadas na B3. *ConTexto*, Porto Alegre, v. 22, n. 51, p. 33-45, 2022.

PESARAN, M. Hashem; SHIN, Yongcheol; SMITH, Richard J. Bounds testing approaches to the analysis of level relationships. *Journal of Applied Econometrics*, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 289-326, 2001.

PLOBERGER, Werner; KRAMER, Walter. The CUSUM test with OLS residuals. *Econometrica*, [S. l.], v. 60, n. 2, p. 271-285, 1992.

POLIZEL, Rafael Taranto; LANA PINTO, Victor Henrique. O preço da seca: efeitos de crises hídricas no setor elétrico brasileiro. *Revista de Política Agrícola*, [S. l.], v. 33, p. e01951, 2024.

SILVA, Benedito Cláudio da *et al.* Assessment of climate change impact on hydropower generation: a case study for Três Marias Power Plant in Brazil. *Climate*, [S. l.], v. 11, n. 10, p. 201, 2023. DOI: 10.3390/cli11100201.

TURNER, Sean W. D. *et al.* *Drought impacts on hydroelectric power generation in the Western United States: a multiregional analysis of 21st century hydropower generation*. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, 2022.

UNEP FI. UNEP Finance Initiative's Comprehensive Good Practice Guide to Climate Stress Testing. Geneva: United Nations Environment Programme Finance Initiative, 2021.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME FINANCE INITIATIVE. *Bridging climate and credit risk: current approaches and emerging trends for climate-related credit risk assessment methodologies - insights from a global survey*. Geneva: United Nations Environment Programme Finance Initiative, 2025.

WHITE, Halbert. A heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimator and a direct test for heteroskedasticity. *Econometrica*, [S. l.], v. 48, n. 4, p. 817-838, 1980.

ZIVOT, Eric; ANDREWS, Donald W. K. Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit-root hypothesis. *Journal of Business & Economic Statistics*, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 251-270, 1992.