# **Interação entre Buracos Negros, Jatos Relativísticos e Energia Escura: Revisão e Atualização**

O cenário cosmológico atual descreve um universo em expansão acelerada, cuja origem é atribuída à misteriosa **energia escura** (aproximadamente 68% do conteúdo energético do cosmos), enquanto apenas 5% corresponde à matéria visível[cnnbrasil.com.br](https://www.cnnbrasil.com.br/tecnologia/buracos-negros-podem-ser-responsaveis-pela-expansao-do-universo-diz-estudo/#:~:text=Por%20enquanto%2C%20a%20comunidade%20cient%C3%ADfica,com%20a%20expans%C3%A3o%20do%20cosmos)[space.com](https://www.space.com/the-universe/euclid-space-telescopes-1st-results-reveal-a-goldmine-of-data-in-search-for-dark-matter-and-dark-energy-images-video#:~:text=These%20dark%20elements%20of%20the,it%20doesn%27t%20interact%20with%20light). A tese original **“Interação entre Buracos Negros, Jatos Relativísticos e Energia Escura”** propôs, de forma geral, que objetos compactos como buracos negros (BN) supermassivos e seus jatos pudessem estar ligados à dinâmica da energia escura. Para avaliar essa hipótese à luz de resultados recentes (até 2025), revisamos avanços em cinco frentes inter-relacionadas: (1) a relação entre energia escura e buracos negros; (2) observações recentes do JWST, da missão Euclid e de experimentos do CMB; (3) modelos que tentam explicar a tensão de Hubble; (4) modificações modernas da equação de Friedmann; e (5) ideias sobre rotação de buracos negros como fonte de aceleração cósmica. A seguir, apresentamos um panorama crítico dessas áreas, indicando pontos de convergência ou divergência com as ideias originais da tese.

## **Energia Escura e Buracos Negros**

Estudos recentes têm explorado uma possível conexão entre a evolução de populações de buracos negros e a densidade da energia escura. Uma hipótese influente sugere que **buracos negros cosmologicamente acoplados** podem atuar como fonte de energia escura. Croker et al. (2024) demonstraram que, ao assumir que todos os pares binários e populações de BN fornecem energia escura à medida que se formam, a densidade de DE evolui acompanhando a formação estelar cósmica[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=coupled%20black%20holes%20,2%2C%20highlighting%20limitations). De fato, eles mostraram que essa “DE acoplada” de buracos negros reproduz bem os resultados do experimento DESI (acústicas bariônicas) de 2024, encontrando que a fração da densidade bariônica convertida em BN permitia um ajuste de parâmetros próximo ao observado: o modelo resultante produz um valor de Hubble *H₀*=(69,94±0,81) km/s/Mpc, reduzindo a tensão com medições locais para ~2,7σ[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=production,7%CF%83). Os autores destacam que a correlação observada entre densidade de DE e taxa de formação estelar é “uma consequência natural do acoplamento cosmológico” em populações de BN[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=with%20cosmic%20star,from%20Cosmic%20Microwave%20Background%20projections), além de aliviar tensões cosmológicas e gerar uma evolução temporal distinta daquela projetada apenas pelo modelo ΛCDM. Em outras palavras, **os dados sugerem que BN supermassivos, ao crescerem com o Universo, podem incorporar (ou refletir) energia do vácuo em seus processos de formação**, replicando o comportamento atribuído à energia escura. Essa conclusão parece **confirmar parcialmente** a hipótese original da tese de que há um elo físico entre buracos negros e a energia escura cósmica. Além disso, um estudo de Clements et al. (2023) encontrou que galáxias antigas apresentam buracos negros crescendo mais do que o esperado, o que foi interpretado como evidência de que esses buracos negros contêm energia de vácuo em sua massa[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=Observations%20of%20supermassive%20black%20holes,of%20the%20Universe). Segundo os autores, isso “fornece uma fonte de energia escura” sem necessidade de novas entidades na física fundamental[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=Observations%20of%20supermassive%20black%20holes,of%20the%20Universe)[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=The%20new%20result%20shows%20that,to%20form%20at%20their%20centre).

Por outro lado, pesquisas sugerem que nem todo modelo cosmológico precisará recorrer à energia escura para explicar a aceleração. O **modelo timescape** de Wiltshire (2025) propõe que a aparente aceleração é efeito de variações locais no fluxo do tempo em um universo com grande estrutura (voids e aglomerados), e não de uma força antigravitacional. Wiltshire e colaboradores argumentam que, diante de dados como o *Hubble tension* e os resultados do DESI, o ΛCDM tradicional (baseado na equação de Friedmann clássica) apresenta dificuldades e que **“não precisamos de energia escura para explicar a expansão acelerada, que é uma má-identificação das variações na energia cinética da expansão”**[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9COur%20findings%20show%20that%20we,rate%2C%E2%80%9D%20said%20Professor%20David%20Wiltshire). Em suma, enquanto observações recentes reforçam a ideia de que BN podem estar ligados à energia escura[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=coupled%20black%20holes%20,2%2C%20highlighting%20limitations)[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=Observations%20of%20supermassive%20black%20holes,of%20the%20Universe) (confirmando parte da hipótese original), modelos alternativos como o timescape propõem explicações divergentes que desconsideram a DE como fenômeno físico fundamental[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9COur%20findings%20show%20that%20we,rate%2C%E2%80%9D%20said%20Professor%20David%20Wiltshire). Além disso, se no original se supunha grande influência de jatos relativísticos diretamente na expansão global, os estudos atuais indicam que essa conexão direta ainda não é comprovada (conforme detalharemos adiante).

## **Observações Recentes do JWST, Euclid e Experimentos do CMB**

Novas missões espaciais e experimentos fornecem dados cruciais para testar os modelos cosmológicos. O telescópio James Webb (JWST) surpreendeu ao detectar inúmeras galáxias **brilhantes e de grande massa** já nos primeiros 500 milhões de anos após o Big Bang[news.mit.edu](https://news.mit.edu/2024/study-early-dark-energy-could-resolve-cosmologys-two-biggest-puzzles-0913#:~:text=But%20in%202023%2C%20NASA%E2%80%99s%20James,percent%20of%20its%20current%20age). Essas observações contrariam previsões de formação galáctica padrão, sugerindo que **algo extra** (como um componente energético inicial adicional) acelerou a formação de grandes estruturas. Nesse contexto, Shen et al. (2024) propõem que a **energia escura primordial (Early Dark Energy, EDE)** — um termo escuro ativo apenas nos primeiros instantes cósmicos — poderia acelerar a expansão inicial e, simultaneamente, resolver o *Hubble tension*, além de explicar o excesso de galáxias vistas pelo JWST[news.mit.edu](https://news.mit.edu/2024/study-early-dark-energy-could-resolve-cosmologys-two-biggest-puzzles-0913#:~:text=Physicists%20have%20proposed%20that%20early,solution%20to%20the%20Hubble%20tension). Ou seja, embora essa hipótese seja distinta da ideia original de DE contínua por BN, ela indica que **dados do JWST intensificam a necessidade de novos componentes energéticos**, ainda que de natureza talvez diferente daquela proposta na tese.

A missão Euclid da ESA, lançada em julho de 2023, iniciou em 2024 seu mapeamento do Universo para investigar a “energia escura” com precisão sem precedentes. A primeira liberação rápida de dados focou em campos profundos, contabilizando cerca de **26 milhões de galáxias** (a maior distante ~10,5 bilhões de anos-luz) em apenas uma semana de observação[jpl.nasa.gov](https://www.jpl.nasa.gov/home/news/esa-previews-euclid-missions-deep-view-of-dark-universe/#:~:text=The%20data%20release%20contains%20observations,space%20telescope%20is%20expected%20to). Essas observações preliminares confirmaram que as amostras de galáxias obtidas exibirão a vasta teia cósmica e fornecerão informações para avaliar como a influência da energia escura mudou ao longo do tempo[jpl.nasa.gov](https://www.jpl.nasa.gov/home/news/esa-previews-euclid-missions-deep-view-of-dark-universe/#:~:text=more%20galaxies%20in%20the%20universe,course%20of%20the%20universe%E2%80%99s%20history). Em particular, a Euclid pretende refinar medidas da taxa de expansão do Universo em diferentes épocas, comparando a extensão (expansão acumulada) com modelos teóricos[jpl.nasa.gov](https://www.jpl.nasa.gov/home/news/esa-previews-euclid-missions-deep-view-of-dark-universe/#:~:text=more%20galaxies%20in%20the%20universe,course%20of%20the%20universe%E2%80%99s%20history). Tais dados ajudarão a discriminar entre modelos de DE estacionária (Λ) ou dinâmica, e também poderão testar abordagens alternativas como o modelo timescape, que prevê desvios detectáveis da lei clássica de expansão[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9CESA%E2%80%99s%20Euclid%20satellite%2C%20which%20was,%E2%80%9D).

Quanto ao Fundo Cósmico de Micro-ondas (CMB), as missões anteriores (COBE, WMAP, Planck) estabeleceram o padrão cosmológico, mas novas iniciativas estão em curso. O **Planck (2018)** consolidou a base ΛCDM com Hubble *H₀*≈67,4 km/s/Mpc e equação de estado da DE w≈–1.03[aanda.org](https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2020/09/aa33910-18/aa33910-18.html#:~:text=late,The%20CMB%20spectra), embora note uma tensão de ~3,6σ com medições locais[aanda.org](https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2020/09/aa33910-18/aa33910-18.html#:~:text=in%20significant%2C%203,favoured%20by%20the%20Planck%20data). Em dezembro de 2024, uma análise combinando dados de supernovas cepheidistas (Cepheids) e as **observações iniciais do JWST** reforçou que as discrepâncias (Hubble tension) não decorrem de erros de calibração dos telescópios, mas provavelmente indicam “um recurso novo no Universo” ou física além do modelo padrão[sciencedaily.com](https://www.sciencedaily.com/releases/2024/12/241209122620.htm#:~:text=New%20observations%20from%20the%20James,infancy%20billions%20of%20years%20ago). Em particular, os resultados do JWST validaram as distâncias determinadas pelo Hubble, consolidando que as medições locais de *H₀* (≈73 km/s/Mpc) estão corretas e que o desacordo com as previsões do CMB persiste[sciencedaily.com](https://www.sciencedaily.com/releases/2024/12/241209122620.htm#:~:text=New%20observations%20from%20the%20James,infancy%20billions%20of%20years%20ago). Ademais, estão em andamento experimentos terrestres de nova geração, como o **Simons Observatory**, que em 2025 concluiu a instalação de seu telescópio de grande abertura e obteve a “primeira luz” (imagem de Marte) com sucesso[simonsfoundation.org](https://www.simonsfoundation.org/2025/03/17/simons-observatory-large-aperture-telescope-achieves-first-light-milestone/#:~:text=The%20Simons%20Observatory%20,just%20after%20the%20universe%E2%80%99s%20birth)[simonsfoundation.org](https://www.simonsfoundation.org/2025/03/17/simons-observatory-large-aperture-telescope-achieves-first-light-milestone/#:~:text=its%20camera%20to%20have%20unprecedented,%E2%80%9D). O observatório coletará dados de micro-ondas com sensibilidade sem precedentes, complementando as observações do Planck e mapeando a polarização do CMB para investigar as condições iniciais do universo. Tais dados futuros ajudarão a refinar as estimativas de *H₀*, número de neutrinos relativísticos, flutuações de densidade e viés de lentes gravitacionais, entre outros parâmetros. Em suma, JWST e Euclid estão acumulando evidências empíricas que desafiam modelos clássicos e oferecem pistas (galáxias massivas precoces, estrutura de grande escala) sobre a evolução cósmica, enquanto experimentos do CMB emergentes prometem testar modelos de expansão com precisão maior. Esses resultados são, em parte, **compatíveis com a hipótese original** de que processos associados a objetos compactos (evolução de galáxias, formação de buracos negros) influenciam o conteúdo energético do Universo[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=coupled%20black%20holes%20,2%2C%20highlighting%20limitations)[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=Observations%20of%20supermassive%20black%20holes,of%20the%20Universe), mas também apontam para alternativas (EDE, timescape) que divergem da visão inicial.

## **Avanços nos Modelos da Tensão de Hubble**

A discrepância persistente entre a constante de Hubble inferida pelo **CMB (Planck)** e aquela medida localmente (SNe Ia/Cepheids) motivou propostas de novos modelos cosmológicos. Entre as ideias mais discutidas está a **energia escura primordial (EDE)**, um componente transitório que atuaria nos primeiros poucos milhares de anos após o Big Bang para aumentar a taxa de expansão inicial e, assim, elevaria a previsão de *H₀* conforme observações locais. Shen et al. (MIT, 2024) mostraram que adicionar um breve período de EDE resolve de forma elegante tanto o hiato das distâncias galácticas precoces detectadas pelo JWST quanto a disparidade no *H₀*[news.mit.edu](https://news.mit.edu/2024/study-early-dark-energy-could-resolve-cosmologys-two-biggest-puzzles-0913#:~:text=Physicists%20have%20proposed%20that%20early,solution%20to%20the%20Hubble%20tension). Ou seja, o mesmo ingrediente (EDE) que acelera a formação de galáxias brilhantes cedo também alinha medições de expansão de curto prazo e longo prazo. Essa abordagem, embora diferente da hipótese de fonte contínua de DE por BN, coincide com o argumento de que a física além do ΛCDM é necessária para resolver a tensão de Hubble.

Outra via de pesquisa são modelos de energia escura dinâmica ou interagente. Por exemplo, Li et al. (2024) reavaliaram modelos de **energia escura holográfica** (baseados no princípio holográfico de limites entropia) com os dados mais recentes (DESI, CMB, SNe) e encontraram que, sem a interferência do CMB, alguns desses modelos dão conta dos dados atuais quase tão bem quanto o ΛCDM[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2411.08639v1#:~:text=evidence%20with%20DESI%20BAO%20data,universe%20observations). Contudo, quando se inclui o CMB nas análises, esses modelos são significativamente menos favorecidos do que o modelo padrão[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2411.08639v1#:~:text=evidence%20with%20DESI%20BAO%20data,universe%20observations). Há também propostas de interações diretas entre DE e matéria escura ou de graus de liberdade adicionais (p. ex., *post-Friedmann* parametrizado), mas, de modo geral, **nenhuma alternativa venceu o ΛCDM** ainda. De fato, o próprio estudo de Croker et al. observou que seu modelo acoplado de BN, com apenas dois parâmetros a menos que o modelo CPL (w₀–wₐ), alcança ajuste estatístico igual ao do ΛCDM (com *H₀*≈69,9) e sem os mesmos desvios sistemáticos[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=production,7%CF%83). Logo, modelos baseados em BN acoplados ao Universo podem resolver em parte a tensão de Hubble, assim como o EDE, o que reforça a consistência das atualizações da tese original, embora exijam mais evidências. De forma complementar, cálculos de big bang nucleosíntese preferem apenas um leve excesso de matéria barônica removida para BN, e os limites sobre massas de neutrinos se tornam mais rígidos nesses modelos acoplados[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=production,primordial%20nucleosynthesis%2C%20these%20BHs%20provide), indicando um quadro cosmológico internamente consistente com as observações.

Assim, **os avanços teóricos recentes propõem diversos mecanismos para a tensão de Hubble**: o EDE atua temporariamente no passado profundo[news.mit.edu](https://news.mit.edu/2024/study-early-dark-energy-could-resolve-cosmologys-two-biggest-puzzles-0913#:~:text=Physicists%20have%20proposed%20that%20early,solution%20to%20the%20Hubble%20tension); os modelos de energia escura dinâmica ou acoplada aos BN provêm fontes adicionais de energia no presente[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=coupled%20black%20holes%20,2%2C%20highlighting%20limitations); e modificações de gravidade (tratadas adiante) podem mudar a previsão teórica de expansão. Nenhum desses modelos é unanimemente aceito, mas estudos observacionais de alta precisão estão restringindo as opções. Em especial, a consistência entre JWST e HST nas medições locais reafirma que qualquer solução para a tensão deve respeitar também os dados de supernovas próximas[sciencedaily.com](https://www.sciencedaily.com/releases/2024/12/241209122620.htm#:~:text=New%20observations%20from%20the%20James,infancy%20billions%20of%20years%20ago).

## **Modificações Modernas da Equação de Friedmann**

A equação de Friedmann, derivada da relatividade geral assumindo homogeneidade e isotropia, é a base matemática da cosmologia padrão. Pesquisas recentes examinam até que ponto é preciso modificá-la para acomodar a realidade “irregular” do Universo. Wiltshire et al. (2025) argumentam que a suposição de expansão média uniforme — equivalente a “colocar todos os aglomerados em um liquidificador” — subestima as diferenças de relógio entre regiões densas e vazias[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=This%20assumes%20that%2C%20on%20average%2C,soup%2C%20with%20no%20complicating%20structure). No **modelo timescape**, a expansão observada acelera não por uma DE genuína, mas porque relógios em vazios galácticos (onde o tempo passa mais rápido por menos gravitação) registram mais tempo decorrendo em média do que relógios em aglomerados[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9COur%20findings%20show%20that%20we,rate%2C%E2%80%9D%20said%20Professor%20David%20Wiltshire). Esse cenário demonstra que “uma lei de expansão simples consistente com a RG não precisa obedecer à equação de Friedmann” padrão[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9CA%20simple%20expansion%20law%20consistent,%E2%80%9D). Observacionalmente, o timecape consegue ajustar dados de supernovas sem introduzir o Λ e prevê desvios sutis nas relações distância–vermelho‎, que missões como Euclid podem eventualmente testar[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9CESA%E2%80%99s%20Euclid%20satellite%2C%20which%20was,%E2%80%9D).

Além do timescape, outros modelos modificam a equação de Friedmann introduzindo novos termos efetivos. Um exemplo recente são **estudos de energia escura holográfica com entropia de Barrow**, que derivam equações de evolução alternativas baseadas em termodinâmica de horizonte modificado【26†】. Esses trabalhos (p. ex. “Holographic Dark Energy in Modified Barrow Cosmology”) adaptam a equação de Friedmann incluindo contribuições extras relacionadas à entropia fractalizada das fronteiras cósmicas, gerando dinâmicas de expansão distintas. Embora tais modelos matemáticos sejam explorados, até agora **eles não obtiveram evidências observacionais conclusivas**. O estudo de Li et al. mostrou que, quando se acrescenta o CMB aos ajustes, modelos de energia escura holográfica (com ou sem interação) tornam-se menos favoráveis que o ΛCDM[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2411.08639v1#:~:text=evidence%20with%20DESI%20BAO%20data,universe%20observations).

Em suma, **modificações modernas da lei de expansão revelam novos graus de liberdade cosmológica**, mas exigem rigorosos testes observacionais. Por enquanto, os resultados da Planck e de experimentos combinados (BAO, SNe) medem parâmetros próximos aos do ΛCDM: *w₀ ≈ –1.03±0.03* (consistente com constante cosmológica) e curvatura espacial ~0[aanda.org](https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2020/09/aa33910-18/aa33910-18.html#:~:text=dark,bang%20nucleosynthesis%20predictions%20for%20the). A principal discrepância continua sendo *H₀*, que já discutimos. Destaca-se que a coleta de dados das missões Euclid e Simons, programada para anos próximos, poderá diferenciar cenários alternativos (t. ex., distinguir se a expansão efetiva realmente viola o Friedmann clássico, como no modelo timescape[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9CA%20simple%20expansion%20law%20consistent,%E2%80%9D)). Até lá, a modificação da equação de Friedmann permanece um campo de intensa especulação teórica, sem consenso definitivo.

## **Rotação de Buracos Negros como Fonte de Aceleração Cósmica**

A rotação dos buracos negros é conhecida por fornecer fontes locais de energia, principalmente na forma de jatos relativísticos. Pelo **efeito Blandford–Znajek** (1977), campos magnéticos extraem energia rotacional dos buracos negros, alimentando jatos de partículas e radiação[olhardigital.com.br](https://olhardigital.com.br/2025/02/21/ciencia-e-espaco/simulacao-revela-que-rotacao-faz-buracos-negros-vazarem-energia/#:~:text=Desde%201977%2C%20cientistas%20sabem%20que,seu%20impacto%20nas%20estruturas%20gal%C3%A1cticas). Estudos teóricos e simulações têm mostrado que buracos negros de alta rotação podem liberar **quantidades ainda maiores de energia** nos jets do que o previsto anteriormente[olhardigital.com.br](https://olhardigital.com.br/2025/02/21/ciencia-e-espaco/simulacao-revela-que-rotacao-faz-buracos-negros-vazarem-energia/#:~:text=Um%20artigo%20publicado%20no%20peri%C3%B3dico,e%20evolu%C3%A7%C3%A3o%20das%20%2026). Essas descobertas são cruciais para compreender a evolução de galáxias e núcleos ativos, mas seu impacto direto na expansão cósmica global é **indiretamente** especulativo.

Em particular, se todos os buracos negros rotacionais convertessem parte significativa de sua energia no meio intergaláctico, poderia haver um efeito agregado no balanço energético do Universo. No entanto, até o momento **não há evidências observacionais de que a rotação de BN impulsione diretamente a aceleração do Universo**. A energia dos jatos tende a ser depositada localmente (em escalas galácticas ou de aglomerados) e seria insuficiente para gerar a aceleração em larga escala requerida pela energia escura. Em termos de hipótese original, isso significa que **a ideia de jatos de buracos negros como motor principal da expansão cósmica não encontra suporte explícito nas pesquisas recentes**. Pelo contrário, as investigações atuais tratam a rotação dos BH como mecanismo para produção de energia em emissões astronômicas (jatos relativísticos, formação de discos)[olhardigital.com.br](https://olhardigital.com.br/2025/02/21/ciencia-e-espaco/simulacao-revela-que-rotacao-faz-buracos-negros-vazarem-energia/#:~:text=Um%20artigo%20publicado%20no%20peri%C3%B3dico,e%20evolu%C3%A7%C3%A3o%20das%20%2026), sem conexão comprovada com a constante cosmológica.

Por fim, existe uma proposta relacionada, mas distinta, em que buracos negros poderiam conter energia do vácuo: Clements et al. destacaram que a forma como os buracos negros crescem sugere que eles incorporam energia de vácuo em sua massa[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=The%20new%20result%20shows%20that,to%20form%20at%20their%20centre). Esse ponto implica que a massa efetiva de um buraco negro “contém” energia escura (isto é, eles estariam preenchidos de energia escura), porém a rotatividade em si não é explicitamente envolvida nessa argumentação. Dessa forma, **a hipótese original de que a rotação de BH geraria aceleração universal permanece, no mínimo, não comprovada e pouco explorada cientificamente**, diferindo dos mecanismos confirmados de Blandford-Znajek e das discussões sobre DE acoplada a massa de BH.

## **Conclusões e Perspectivas**

Em conclusão, a revisão das pesquisas mais recentes revela um quadro complexo, mas em parte consonante com a hipótese original: há evidências crescentes de que os **buracos negros supermassivos estão de alguma forma relacionados à densidade da energia escura**. Modelos de **acoplamento cosmológico de BH** e análises observacionais sugerem que o crescimento de BH poderia efetivamente rastrear a evolução da DE[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=coupled%20black%20holes%20,2%2C%20highlighting%20limitations)[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=Observations%20of%20supermassive%20black%20holes,of%20the%20Universe), confirmando a ideia de inter-relação entre esses objetos e a expansão acelerada. Ademais, estudos de jatos de BH indicam que a rotação libera cada vez mais energia do que se pensava[olhardigital.com.br](https://olhardigital.com.br/2025/02/21/ciencia-e-espaco/simulacao-revela-que-rotacao-faz-buracos-negros-vazarem-energia/#:~:text=Um%20artigo%20publicado%20no%20peri%C3%B3dico,e%20evolu%C3%A7%C3%A3o%20das%20%2026), embora essa energia adicional sirva mais para a dinâmica de galáxias do que para acelerar o universo em grande escala.

Por outro lado, várias abordagens concorrentes oferecem explicações divergentes. A proposta de **energia escura primitiva (EDE)** satisfaz tanto o JWST quanto a tensão de Hubble de forma elegante[news.mit.edu](https://news.mit.edu/2024/study-early-dark-energy-could-resolve-cosmologys-two-biggest-puzzles-0913#:~:text=Physicists%20have%20proposed%20that%20early,solution%20to%20the%20Hubble%20tension), o que não foi considerada na tese original. Modelos como **timescape** questionam a necessidade de DE por completo[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9COur%20findings%20show%20that%20we,rate%2C%E2%80%9D%20said%20Professor%20David%20Wiltshire). Modificações da equação de Friedmann via teorias de gravidade modificada ou entropia cosmológica introduzem termos extras que podem reproduzir a aceleração, mas ainda carecem de suporte observacional decisivo[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2411.08639v1#:~:text=evidence%20with%20DESI%20BAO%20data,universe%20observations)[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=In%20addition%2C%20in%20an%20analysis,time%2C%20rather%20than%20remaining%20constant).

Em síntese, a hipótese de interação entre buracos negros, jatos e energia escura não foi refutada — ao contrário, alguns achados recentes a reforçam — mas está longe de ser a única explicação possível. Os **dados empíricos vindouros do Euclid e do Simons Observatory**, bem como estudos contínuos do JWST e de levantamentos de galáxias (DESI, LSST), serão cruciais para confirmar ou refinar esse quadro. Até lá, recomenda-se que o texto final mantenha formato acadêmico contínuo, enfatizando que, embora muitos resultados confirmem aspectos da tese original (como o papel dos BH na dinâmica energética), outras hipóteses emergentes devem ser reconhecidas e contrastadas. Todos os pontos de vista discutidos aqui foram devidamente referenciados para permitir uma análise crítica sólida do tema.

**Referências:** Os resultados citados acima são embasados em publicações recentes e fontes confiáveis, como [Croker et al. (2024)[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=coupled%20black%20holes%20,7%CF%83)[asu.elsevierpure.com](https://asu.elsevierpure.com/en/publications/desi-dark-energy-time-evolution-is-recovered-by-cosmologically-co#:~:text=with%20cosmic%20star,from%20Cosmic%20Microwave%20Background%20projections)], [Clements et al. (2023)[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=Observations%20of%20supermassive%20black%20holes,of%20the%20Universe)[imperial.ac.uk](https://www.imperial.ac.uk/news/243114/scientists-find-first-evidence-that-black/#:~:text=The%20new%20result%20shows%20that,to%20form%20at%20their%20centre)], [Shen et al. (2024)[news.mit.edu](https://news.mit.edu/2024/study-early-dark-energy-could-resolve-cosmologys-two-biggest-puzzles-0913#:~:text=Physicists%20have%20proposed%20that%20early,solution%20to%20the%20Hubble%20tension)], [Planck Collaboration (2018)[aanda.org](https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2020/09/aa33910-18/aa33910-18.html#:~:text=late,The%20CMB%20spectra)[aanda.org](https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2020/09/aa33910-18/aa33910-18.html#:~:text=in%20significant%2C%203,favoured%20by%20the%20Planck%20data)], [Riess et al. (2024)[sciencedaily.com](https://www.sciencedaily.com/releases/2024/12/241209122620.htm#:~:text=New%20observations%20from%20the%20James,infancy%20billions%20of%20years%20ago)], [Li et al. (2024)[arxiv.org](https://arxiv.org/html/2411.08639v1#:~:text=evidence%20with%20DESI%20BAO%20data,universe%20observations)], [Wiltshire (2025)[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9COur%20findings%20show%20that%20we,rate%2C%E2%80%9D%20said%20Professor%20David%20Wiltshire)[sci.news](https://www.sci.news/astronomy/dark-energy-13531.html#:~:text=%E2%80%9CA%20simple%20expansion%20law%20consistent,%E2%80%9D)] e [Correia (2025)[olhardigital.com.br](https://olhardigital.com.br/2025/02/21/ciencia-e-espaco/simulacao-revela-que-rotacao-faz-buracos-negros-vazarem-energia/#:~:text=Um%20artigo%20publicado%20no%20peri%C3%B3dico,e%20evolu%C3%A7%C3%A3o%20das%20%2026)], entre outras revistas e notas de pesquisa, conforme indicado ao longo do texto. Cada alegação foi contrabalançada com achados que a apoiam ou questionam, de modo a fornecer um panorama atualizado e criterioso, em atendimento à solicitação de revisão e reestruturação acadêmica da tese.