

ANÁLISES E DISCUSSÕES DE IMPACTOS ECONÔMICO-FINANCEIROS ASSOCIADOS AO EFEITO REBOTE E AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM O INVESTIMENTO EM GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA PARA PROSSUMIDORES

ANALYSIS AND DISCUSSION OF ECONOMIC-FINANCIAL IMPACTS ASSOCIATED WITH THE REBOUND EFFECT AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES LINKED TO SOLAR PHOTOVOLTAIC GENERATION INVESTMENT FOR PROSUMERS

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS IMPACTOS ECONÓMICO-FINANCIEROS ASOCIADOS AL EFECTO REBOTE Y A LAS MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA VINCULADAS A LA INVERSIÓN EN GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA PARA PROSUMIDORES

Daniel Tenfen¹, Lucas Formentão Rodrigues², Edison Antônio Cardoso Aranha Neto³, Rubiapiara Cavalcante Fernandes⁴

DOI: 10.54899/dcs.v23i93.6544

Recibido: 10/07/2026 | Aceptado: 03/08/2026 | Publicación en línea: 10/08/2026.

RESUMO

Este artigo busca analisar o aspecto econômico-financeiro da implantação de sistemas fotovoltaicos com o sistema de compensação de energia no Brasil, avaliando os impactos do Efeito Rebote - Paradoxo de Jevons, ocasionado pela maior disponibilidade energética com a presença de geração fotovoltaica e um menor custo de energia para o prosumidor, também considerando ao invés do efeito rebote, ações de eficiência energética. Na revisão bibliográfica foram analisados os periódicos mais relevantes acerca do tema, trazendo-os para o trabalho e verificando-se que o estudo é de caráter inovador, principalmente na perspectiva do consumidor que deseja ser um prosumidor e a análise, mesmo que simplificada, dos impactos econômicos-financeiros de um investidor nesta geração. A metodologia utilizada considera uma análise para investimentos do consumidor em geração fotovoltaica buscando o *Net Zero*, 25, 50 e 75, com um acréscimo de até 20% pelo Efeito Rebote e, após, o máximo valor de incremento de consumo no qual há o ponto de equilíbrio. Também é analisada a questão de ação de eficiência energética de até -20% do consumo, após a instalação do sistema fotovoltaico, trazendo-se um contraponto ao Efeito Rebote. Os resultados mostram que quando existe este aumento de consumo após a instalação dos sistemas fotovoltaicos, principalmente em sistemas menores, sua atratividade econômica-financeira é impactada significativamente, podendo não existir. Verificou-se que a

¹ Doutor em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) - campus Florianópolis, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: daniel.tenfen@ifsc.edu.br

² Graduando em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) - campus Florianópolis, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: lucas.fr16@aluno.ifsc.edu.br

³ Doutor em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) - campus Florianópolis, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: earanha@ifsc.edu.br

⁴ Doutora em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC) - campus Florianópolis, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. E-mail: piara@ifsc.edu.br

instalação do sistema combinado com uma ação de eficiência energética, que reduz o consumo de energia, torna o investimento mais atrativo. Por fim, é discutida a questão do impacto do Efeito Rebote na sustentabilidade.

Palavras-chave: Efeito Rebote. Paradoxo de Jevons. Análise Econômica-Financeira. Prosumidor. Geração Fotovoltaica. Eficiência Energética.

RESUMEN

Este artículo analiza los aspectos económicos y financieros de la implementación de sistemas fotovoltaicos bajo el esquema de medición neta de Brasil, evaluando los impactos del efecto rebote (paradoja de Jevons) —impulsado por una mayor disponibilidad de energía proveniente de la generación fotovoltaica y menores costos energéticos para el "prosumidor"— y considerando, al mismo tiempo, medidas de eficiencia energética como contrapeso a dicho efecto. Se realizó una revisión bibliográfica de publicaciones relevantes, destacando el carácter innovador del estudio —particularmente desde la perspectiva de un consumidor que aspira a convertirse en prosumidor— y ofreciendo un análisis (aunque simplificado) de los impactos económicos y financieros para un inversor en este tipo de generación. La metodología evalúa la inversión del consumidor en generación fotovoltaica con el objetivo de alcanzar un balance neto cero (*Net Zero*), así como coberturas del 25%, 50% y 75%, teniendo en cuenta un aumento del consumo de hasta el 20% debido al efecto rebote e identificando el incremento máximo de consumo en el que se alcanza el punto de equilibrio. Asimismo, se analiza el impacto de medidas de eficiencia energética —que reducen el consumo hasta en un 20% tras la instalación del sistema— como contrapeso al efecto rebote. Los resultados indican que, cuando el consumo aumenta tras la instalación de sistemas fotovoltaicos —especialmente los de menor tamaño—, su atractivo económico y financiero se ve considerablemente mermado, pudiendo llegar a hacer inviable la inversión. El estudio concluye que combinar la instalación del sistema con medidas de eficiencia energética que reduzcan el consumo de energía hace que la inversión resulte más atractiva. Finalmente, se aborda el impacto del efecto rebote en la sostenibilidad.

Palabras clave: Efecto Rebote. Paradoja de Jevons. Análisis Económico-Financiero. Prosumidor. Generación Fotovoltaica. Eficiencia Energética.

ABSTRACT

This paper analyzes the economic and financial aspects of implementing photovoltaic systems under Brazil's net metering scheme, evaluating the impacts of the Rebound Effect (Jevons Paradox)—driven by increased energy availability from photovoltaic generation and lower energy costs for the "prosumer"—while also considering energy efficiency measures as a counterpoint to the rebound effect. A literature review of relevant journals was conducted, highlighting the study's innovative nature—particularly from the perspective of a consumer aspiring to become a prosumer—and providing an analysis (albeit simplified) of the economic and financial impacts for an investor in this type of generation. The methodology evaluates consumer investment in photovoltaic generation aiming for Net Zero, as well as 25%, 50%, and 75% coverage, factoring in a consumption increase of up to 20% due to the Rebound Effect and identifying the maximum consumption increase at which the break-even point is reached. It also analyzes the impact of energy efficiency measures—reducing consumption by up to 20% following system installation—as a counterpoint to the Rebound Effect. The results indicate that

when consumption increases after installing photovoltaic systems—especially smaller ones—their economic and financial attractiveness is significantly compromised, potentially rendering the investment unviable. The study found that combining the system installation with energy efficiency measures that reduce energy consumption makes the investment more attractive. Finally, the impact of the Rebound Effect on sustainability is discussed.

Keywords: Rebound Effect. Jevons Paradox. Economic-Financial Analysis. Prosumer. Photovoltaic Generation. Energy Efficiency.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O uso de energia, em suas diversas formas, é fundamental para o desenvolvimento social e científico contemporâneo. Neste contexto, a energia elétrica se destaca como um componente essencial no funcionamento da economia e na satisfação das necessidades básicas da população, sendo protagonista na transição energética. Diante disso, a busca por fontes alternativas e renováveis tem se tornado cada vez mais evidente, e a energia fotovoltaica surge como uma excelente opção (Gasparin, 2019).

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2024, publicado pela EPE, a geração solar fotovoltaica no Brasil cresceu aproximadamente 68,1% entre 2022 e 2023, consolidando-se como um expoente no cenário energético brasileiro. O estudo da viabilidade do investimento e dos impactos econômicos dessa forma de geração de energia, principalmente na micro e minigeração de energia elétrica, tem sido corroborado com a aceitação desta fonte (Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

Em se tratando dos métodos de análise econômico-financeira para investimentos em energia renovável, a revisão por Delapedra-Silva *et al.* (2022) identifica que os métodos mais comuns para a realização desta análise, como Retorno sobre Investimento (ROI), Payback, Fluxo de Caixa Descontado (DCF) e Opções Reais (RO), têm como objetivo principal avaliar a viabilidade econômica com base em indicadores consolidados, considerando variáveis como custos de capital, operação e manutenção, receitas previstas e taxa de desconto. No entanto, a revisão evidencia que esses modelos assumem premissas fixas de consumo ou de desempenho energético, não incorporando de forma explícita fenômenos comportamentais como o efeito rebote. Assim, embora sejam eficazes para mensurar rentabilidade e risco sob cenários estáticos,

esses métodos podem superestimar os benefícios econômicos quando variações de consumo induzidas pela tecnologia não são contabilizadas.

Este efeito rebote que os estudos deixam de considerar, como explica Özsoy (2024), acontece quando as economias de energia esperadas após melhorias na eficiência não se concretizam totalmente. Isso porque, ao tornar o uso da energia mais barato e eficiente, os consumidores passam a utilizar mais energia, o que pode reduzir ou até anular as economias previstas. Esse comportamento é influenciado por fatores como o aumento do consumo por conta da redução nos custos com mudanças nos hábitos de uso. Ou seja, mesmo com tecnologias mais eficientes, o consumo de energia pode crescer ao se introduzir novas fontes energéticas, o que torna o efeito rebote um desafio para quem busca reduzir o impacto ambiental e economizar energia.

Os impactos deste efeito podem ser analisados observando os estudos de Wang *et al.* (2015), que mensuraram o Efeito Rebote no consumo de energia elétrica em residências, desenvolvendo cálculos e estimativas baseados em dados obtidos em Pequim, China. Os resultados do estudo indicam que, a curto prazo, os valores do *Rebound Effect* variam de 24% a 37%, enquanto a longo prazo esses valores vão de 46% a 56%. A isto os autores denominam Efeito Rebote Parcial, visto que a elevação do consumo não ultrapassa os valores prévios como conjecturado pelo Paradoxo de Jevons, mas ainda assim apresenta economia inferior à esperada. Além deste trabalho, outros trabalhos científicos são investigados e apresentados no Capítulo de Estado da Arte.

Diante desse cenário, se mostra importante a análise dos impactos econômico-financeiros causados por este Efeito Rebote Parcial, principalmente pela introdução da geração solar fotovoltaica, com o objetivo de esclarecer os impactos da alteração de consumo. De acordo com Maslow (1954), por sua teoria das necessidades humanas, ao entender suas motivações, o consumidor pode fazer melhorias e ajustes conscientes em seu comportamento. Também, este artigo contribui com a abordagem lógica de otimizar o consumo (reduzindo desperdícios, melhorando a eficiência) antes, ou em conjunto, com a implementação de geração própria, ou entendendo os efeitos do aumento do consumo. Assim, o desenvolvimento deste estudo se justifica pela busca de uma compreensão mais aprofundada desse fenômeno, oferecendo uma abordagem clara e simplificada que auxilie na tomada de decisões conscientes, minimizando os efeitos indesejados e promovendo a eficiência do gerenciamento do consumo e a discussão do tema.

ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é apresentado o estado da arte do tema estudado. As pesquisas foram realizadas em cinco principais bancos de dados de trabalhos acadêmicos, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, WIREs online library, e MDPI, para os quais o método utilizado foi de realizar a pesquisa avançada com combinações das palavras-chave relacionadas ao presente artigo: “Jevons Paradox”, “Rebound (Effect)” e “Photovoltaic”/“PV”. Ressalta-se que foram desconsiderados os resultados que tratam de outro efeito também conhecido como *Rebound Effect*, caracterizado pela elevação abrupta da potência demandada em unidades consumidoras com geração fotovoltaica, nos horários de redução da incidência solar.

Utilizando a ferramenta de pesquisa avançada do IEEE Xplore, o seguinte texto foi pesquisado com base na formatação da própria plataforma: (“Document Title”:Rebound OR “Document Title”:Rebound OR “Document Title”:Jevons Paradox) AND (“Document Title”:PV OR “Document Title”:Photovoltaic)). Como a pesquisa retornou apenas um resultado, o escopo foi ampliado para, ao invés de apenas procurar pelos termos no título do documento, procurar em todos os metadados, com o parâmetro “All Metadata”. Com esta alteração no parâmetro a pesquisa retorna 38 resultados. Destes resultados, nenhum dos estudos se mostra relevante para o presente artigo, visto que a maior parte trata de outras áreas, e os estudos da área tratam do homônimo do *Rebound Effect* previamente mencionado.

No banco de dados da SpringerLink a pesquisa avançada foi realizada primeiramente pelo campo de títulos, com os seguintes termos: (Rebound Effect AND (Photovoltaic OR PV)) OR (Jevons Paradox AND (Photovoltaic OR PV)). A pesquisa não obteve resultados, então foi ampliada para o campo de palavras-chave, retornando 2671 trabalhos. Notando que a quantidade de estudos não relevantes era muito grande, o escopo foi reduzido por meio dos filtros de Disciplinas, selecionando Engenharia e Energia, retornando desta forma 416 resultados. Não foram encontrados estudos relevantes para a pesquisa, apesar do grande número de resultados. Isto se deve ao fato de que a ferramenta de pesquisa por palavras-chave da Springer Nature aparentemente pesquisa pelas palavras em todo o arquivo, não apenas nas palavras-chave definidas pelos autores, assim a pesquisa retorna trabalhos que citam alguns dos termos desejados, mas que não tratam destes como tópicos principais.

A pesquisa avançada no banco de dados MDPI foi realizada pesquisando individualmente as combinações de “Rebound Effect” com “Photovoltaic” ou “PV”, e “Jevons Paradox” com

“Photovoltaic” ou “PV”. Foi utilizada a pesquisa com operadores lógicos nativa do banco de dados, buscando resultados para estes termos nos títulos, resumos e palavras-chaves definidas pelos autores. A combinação de “Rebound Effect” com “Photovoltaic” ou “PV” retornou um único resultado, para resumos com estes termos, no entanto este tratava do efeito homônimo ao rebote já mencionado, não sendo de interesse para o atual estudo. As combinações de “Jevons Paradox” com “Photovoltaic” ou “PV” não obtiveram retornos.

Realizando a pesquisa avançada no banco de dados WIREs online library, os seguintes termos foram utilizados: (“Rebound Effect” AND (Photovoltaic OR PV)) OR (“Jevons Paradox” AND (Photovoltaic OR PV)). A pesquisa foi realizada com o filtro “anywhere”, que busca pelos termos em qualquer parte do artigo, seja título, resumo ou texto, retornando 21 resultados, dos quais apenas um se mostrou dentro do tema.

Na plataforma ScienceDirect foi utilizado o campo de pesquisa avançada “Title, abstract or author-specified keywords”, nele foram inseridos os termos no mesmo padrão utilizado previamente: (Rebound Effect AND (Photovoltaic OR PV)) OR (Jevons Paradox AND (Photovoltaic OR PV)). Desta forma, a pesquisa retorna todos os artigos que apresentarem estes termos no título, resumo ou palavras-chave. A pesquisa retornou 43 resultados, dos quais 14 se mostram relevantes aos temas discutidos no presente estudo. Estes foram analisados e seus resultados apresentados.

O trabalho de Motlagh *et al.* (2015) apresenta três métodos de análise para inferir padrões de comportamento deliberativos em residências com capacidade de geração elétrica fotovoltaica. O estudo realizado com um grupo de controle de 400 unidades consumidoras encontra padrões comportamentais gerais, bem como específicos de unidades que possuem capacidade de geração, possibilitando a análise de como futuras tarifas podem afetar os padrões de consumo destas residências.

As pesquisas de Deng e Newton (2017) buscam avaliar o impacto da geração fotovoltaica no consumo de energia doméstico, com uma amostragem de mais de 4.000 residências em Sydney, na Austrália. Os resultados indicam que o efeito rebote é responsável por reduzir em até um quinto do benefício de carbono da energia fotovoltaica gerada.

A pesquisa de Wang *et al.* (2024) analisou o comportamento de consumidores em províncias chinesas, concluindo que incentivos econômicos aliados de campanhas ambientais levavam a redução de consumo mesmo após a instalação de painéis fotovoltaicos, notando, entretanto, uma tendência entre residências de renda elevada a uma menor inclinação a

conservação de eletricidade, sugerindo a possibilidade de um Efeito Rebote ou Paradoxo de Jevons.

Mementin *et al.* (2025) estudaram a adoção e impactos econômicos de sistemas fotovoltaicos, observando uma correlação entre uma melhor condição de incidência solar ou moradia (residências novas, unifamiliares) e a adoção de módulos solares, sugerindo a possibilidade de um efeito rebote devido ao elevado consumo destas residências em relação a outras que não realizaram este investimento.

Os estudos de Matthew E. Oliver (2023) analisam evidências empíricas do efeito rebote solar e propõem o investimento em geração fotovoltaica em larga escala ao invés de subsidiar MMGD, desta forma reduzindo tanto o efeito rebote quanto as emissões de carbono.

Ray Galvin (2022) analisa o efeito rebote na Alemanha por outra ótica, vendo-o como um aumento no conforto geral dos habitantes de residências que investiram em geração fotovoltaica, sugerindo que este conforto não seria possível de outra maneira por motivos financeiros e apontando-o como um incentivo para a instalação de sistemas fotovoltaicos. O autor sugere que o governo subsidie mais sistemas fotovoltaicos pequenos ao invés de grandes, buscando um maior bem estar da população aliado à redução de carbono. É preciso levar em consideração, no entanto, que o efeito rebote não necessariamente resulta em um aumento no conforto, e seus custos adicionais podem reduzir o retorno esperado.

Boccard e Gautier (2021) estudam as consequências não intencionais de subsídios para instalação de sistemas fotovoltaicos. As pesquisas realizadas em Wallonia (Bélgica) indicam que incentivos à injeção e subsídios generosos para instalação destes sistemas levam consumidores a superdimensionar seus sistemas para se beneficiar destes subsídios e posteriormente acabam por consumir a maior parte da sua produção em excesso. Os autores afirmam que o efeito é economicamente significativo e apontam para evidências de expressivos aumentos no consumo de energia por parte de consumidores que instalaram painéis solares, o que vai contra o intuito inicial dos subsídios.

O trabalho de Toroghi e Oliver (2019) desenvolve um método novo de análise e estimativa do efeito rebote baseado em modelagem de sistemas de informações geográficas e econômicas. O método é ilustrado por um exemplo numérico com dados a nível de bairro, e tem como objetivo melhorar a previsibilidade do efeito rebote e auxiliar legisladores a desenvolver métodos com a finalidade de mitigar estes efeitos.

O estudo de Kim e Trevena (2021) analisa o efeito rebote por meio da análise de consumo

pré e pós instalação de sistemas fotovoltaicos em San Diego, Califórnia, com resultados que revelam variações significativas no consumo elétrico dependendo da localização geográfica.

Kratschmann e Dütschke (2021) realizam uma análise crítica das mensagens veiculadas por instaladores de sistemas fotovoltaicos para potenciais clientes na Alemanha. O estudo observa que os métodos utilizados para convencer os consumidores possuem a tendência de fazê-los acreditar que já fizeram sua parte para o meio ambiente ao instalar o sistema fotovoltaico. Desta forma, clientes são induzidos a realizar o investimento e posteriormente aumentar o consumo por acreditarem que adquiriram o direito para tal.

O trabalho de Aydin *et al.* (2023) busca evidências em residências neerlandesas do efeito rebote da adoção de painéis solares. Os resultados indicam uma relação crescente entre a geração e o consumo de energia, encontrando o valor percentual de 7,7%.

Galvin *et al.* (2021) realizam uma pesquisa interdisciplinar entre saúde e eletricidade, analisando os padrões de consumo em residências alemãs e confirmando efeitos rebote substanciais para unidades que optam por gerar energia. A pesquisa levou ao consenso e descoberta nova de que, na Alemanha, o regime regulatório e de preço da energia elétrica inadvertidamente recompensa unidades que consumam mais eletricidade após o investimento em geração fotovoltaica.

O estudo de Galvin (2021) utiliza dados qualitativos de entrevistas com prosumidores, propondo um método de interpretação do comportamento relacionado ao efeito rebote e ao rebote inverso. A pesquisa inclui efeitos monetários e na própria atitude dos consumidores; efeitos sociotécnicos; influências da natureza; e efeitos regulatórios. O autor afirma que os resultados do estudo podem informar pesquisas de nível nacional para que seja possível quantificar e estimar os fatores determinantes do efeito rebote e rebote inverso.

Li *et al.* (2020) realizam análises de dados de 409 residências chinesas de 2016 a 2017, utilizando um modelo de regressão interativo com indicadores de comportamento humano. Os resultados encontrados apontam para valores negativos de efeito rebote para as unidades prosumidoras, indicando que estas reduziram o consumo mesmo após a instalação de geração fotovoltaica.

Em seu estudo, Özsoy (2024) reconhece o papel fundamental de pesquisas acadêmicas em moldar estratégias e políticas de gerenciamento de energia. Devido a isso, o autor conduz uma revisão bibliográfica compreensível, acessando 530 artigos relacionados ao tópico, dos principais bancos de dados acadêmicos. Seu estudo explora a literatura extensa do efeito rebote energético,

destacando um foco predominantemente residencial e industrial na maioria dos estudos.

Por meio do estudo do estado da arte, nota-se a ausência de trabalhos que analisem os impactos econômicos da perspectiva do prosumidor com o auxílio de métodos de análise de investimento consciente do tema. Desta forma, o presente estudo se mostra relevante para ampliar o horizonte de estudos acerca do efeito rebote com a instalação de sistemas fotovoltaicos, bem como promover a conscientização dos consumidores, tratando de termos diretamente relacionados à realidade de seus investimentos, como o tempo de *Payback* e o lucro ao final da vida útil do investimento.

METODOLOGIA

Para calcular de maneira simplificada os impactos do Efeito Rebote Parcial, considera-se o valor médio de energia gerada para 4 kWp instalados na região de Florianópolis, SC, resultando em um valor semanal de 111,25 kWh. Desta forma, para os cálculos da planilha de *Net Zero* energético, foi utilizado o mesmo valor de consumo bruto semanal. Com base nisto são realizados os cálculos de injeção, consumo líquido e consumo rede, sendo este último definido como a soma dos valores horários positivos do consumo líquido.

Ressalta-se que todos esses cálculos são realizados considerando valores horários de geração e consumo, diferenciando perfis de consumidor residencial e comercial. Este detalhamento permite pavimentar o caminho para pesquisas mais detalhadas, que possam incorporar fatores adicionais, como o impacto do fator de simultaneidade do consumo, bem como cobranças relacionadas à geração de energia, como a TUSD fio B, entre outras.

Após o cálculo destes valores, foram aplicadas variações no consumo bruto, mantendo a geração inalterada. Estas variações foram fixadas, a princípio, em $\pm 20\%$ em intervalos de 5%, posteriormente, sendo analisados outros percentuais conforme os resultados se mostrassem relevantes. Os valores percentuais negativos seriam relativos aos casos que além da instalação do sistema fotovoltaico, haveria também a eficiência energética (sem custos) adicionada aos hábitos de consumo deste consumidor e, o aumento do consumo, relativo ao efeito rebote.

Em seguida, foi desenvolvida uma planilha de resultados, compilando todos os valores obtidos para os percentuais analisados e plotando gráficos, assim facilitando a visualização dos impactos elétricos das variações de consumo.

Por fim, calcularam-se os impactos financeiros dessas variações. Para isto, adotou-se o

método do *Payback* Descontado (Kim e Lim, 2024), considerando uma TMA de 15%, um custo médio para instalação de sistemas fotovoltaicos de R\$3.000,00/kWp e uma tarifa de energia de R\$0,61791/kWh (com base na CELESC, grupo B, vigente no momento da pesquisa). Ressalta-se que, por se tratar de uma análise simplificada, a diferenciação entre consumidores residenciais e comerciais sem considerar o fator de simultaneidade e cobranças referentes à injeção não gera resultados diferentes, mas serve como base para futuras iterações do estudo. Também, mantendo-se a ideia de análise simplificada, não foram consideradas degradação de geração dos módulos fotovoltaicos, troca de inversores ao longo da análise temporal (25 anos), aumento da tarifa de energia elétrica e a sensibilidade a estes valores.

Essas etapas foram repetidas, incorporando variações de geração elétrica de forma a atingir *Net* 25, 50 e 75, representando uma geração de energia elétrica que corresponde a 75%, 50% e 25% do consumo, respectivamente, permitindo avaliar os impactos nos casos em que o consumidor opta por instalar sistemas fotovoltaicos para gerar apenas uma parte do seu consumo, reduzindo o investimento inicial.

RESULTADOS

Os resultados indicam que as variações de consumo de energia analisadas são responsáveis por impactos numéricos idênticos no consumo líquido, mas que os valores percentuais variam mais quanto maior o valor de potência fotovoltaica instalada. Isto se deve ao fato de que, ao atingir o equilíbrio entre geração e consumo no *Net Zero*, pequenas variações no consumo bruto representam variações percentuais significativamente maiores no consumo líquido, uma vez que este tende a valores menores.

Por outro lado, ao analisar as variações numéricas do “consumo rede” - ou seja, o valor de energia consumida que não é suprida pela geração simultânea -, os valores são mais representativos nos impactos financeiros. Em especial, verificam-se variações mais expressivas para menores valores de geração. Este comportamento indica que os impactos financeiros possuem uma relação inversamente proporcional com o percentual de energia gerada em relação ao consumo. No entanto, essa relação isolada não é suficiente para uma análise completa dos impactos financeiros.

Desta forma, os impactos financeiros são mais facilmente compreendidos pelos resultados da análise de investimento realizada utilizando o cálculo do *Payback* Descontado. Os resultados

resumidos são apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4. O percentual de consumo das tabelas é relativo ao consumo inicial.

Tabela 1. Resultados resumidos *Net Zero* e Resultados resumidos *Net 25*

Consumo [%]	Ano Payback	VPL	Consumo [%]	Ano Payback	VPL
80%	5	13.596,34	80%	5	11.263,77
85%	5	12.529,83	85%	5	10.197,26
90%	5	11.463,31	90%	5	9.130,74
95%	6	10.396,80	95%	6	8.064,23
100%	6	9.330,28	100%	6	6.997,71
105%	7	8.263,77	105%	7	5.931,20
110%	7	7.197,26	110%	8	4.864,68
115%	8	6.130,74	115%	9	3.798,17
120%	9	5.064,23	120%	10	2.731,66
143,7%	25	8,95	132,78%	25	5,65

Fonte: Elaboração própria

Tabela 2. Resultados resumidos *Net 50* e Resultados resumidos *Net 75*

Consumo [%]	Ano Payback	VPL	Consumo [%]	Ano Payback	VPL
80%	4	8.931,20	80%	3	6.598,63
85%	4	7.864,68	85%	3	5.532,11
90%	5	6.798,17	90%	4	4.465,60
95%	5	5.731,66	95%	5	3.399,09
100%	6	4.665,14	100%	6	2.332,57
105%	7	3.598,63	105%	9	1.266,06
110%	9	2.532,11	110%	18	199,54
115%	11	1.465,60	110,93%	25	1,17
120%	18	399,09			
121,85%	25	4,47			

Fonte: Elaboração própria

Os resultados apresentam variações de tempo de *Payback* maiores quanto menor o valor de geração para um mesmo aumento de consumo. Como exemplo, o consumidor que instalar 4kWp e aumentar o consumo em 10% vai levar seu tempo de *Payback* de 6 para 7 anos, enquanto o consumidor que instalar 1kWp e realizar o mesmo aumento de consumo percentual leva este tempo de 6 para 18 anos.

O presente estudo restringiu a análise aos percentuais de consumo que resultam em um tempo de retorno do investimento igual ou inferior a 25 anos, considerando que este corresponde,

em média, à vida útil dos módulos fotovoltaicos operando com aproximadamente 80% de sua capacidade inicial (Jordan; Kurtz, 2013). Dessa forma, elevações no consumo que prolonguem o payback para além desse horizonte temporal não foram consideradas, pois, nesse cenário, o sistema atingiria o fim de sua vida útil estimada antes de recuperar integralmente o investimento.

Assim, ao calcular o limite que mantém o tempo de payback em, no máximo, 25 anos, obteve-se um percentual de 15,48% para a relação entre economia obtida e investimento inicial, e de 43,7% para a relação entre variação de consumo e geração total do sistema. Em outras palavras, considerando a taxa mínima de atratividade (TMA) adotada, um consumidor em condição de *Net Zero* que eleve seu consumo acima de 43,7% não conseguirá recuperar o investimento dentro do período de vida útil dos módulos. De forma análoga, para a condição *Net 50*, um aumento no consumo superior a 21,85% resultará no mesmo tempo de payback, sendo o mesmo raciocínio aplicável aos demais cenários equivalentes.

Por fim, destaca-se que os valores percentuais encontrados pelas relações descritas se aplicam para quaisquer casos que utilizem o mesmo valor de TMA e tarifa. Dessa forma, independentemente dos valores absolutos de consumo e geração, os tempos de *payback* resultantes seguirão a mesma tendência observada nos cálculos apresentados.

COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que a variação no consumo impacta diretamente a viabilidade econômica do investimento em energia fotovoltaica, sendo esse impacto mais intenso quanto menor for o percentual de instalação de geração. Desta forma é possível concluir que, especialmente para investimentos menores, é de suma importância que o consumidor busque evitar ao máximo o aumento do consumo, visto que uma pequena variação é suficiente para este investimento gerar apenas prejuízos. Em relação a maiores percentuais de geração, o impacto de menores variações no consumo, apesar de não inviabilizar o investimento, reduz significativamente o lucro obtido ao final dos 25 anos, fato importante a se considerar na tomada de decisões.

Além disso, deve-se considerar a possibilidade de aliar o investimento em energia fotovoltaica com ações de eficiência energética. De acordo com os resultados, conclui-se que estas ações seriam o ideal para o maior lucro possível e menor tempo de *Payback*, sendo mais significativas quanto menor o percentual de energia gerada. No entanto, é importante levar em

conta que em unidades consumidoras que já implementam ações de eficiência energética de custo zero ou baixo custo, reduzir o consumo implicaria em maiores investimentos, que necessitam de suas próprias análises de viabilidade para garantir o lucro esperado.

Portanto, recomenda-se visar uma maior eficiência energética tanto quanto for possível, mas essencialmente evitar a elevação de consumo. Essa tendência, descrita pelo Efeito Rebote, é responsável por impactos financeiros significativos que eventualmente resultam na inviabilização do investimento.

Desta forma, seguindo as recomendações apresentadas e observando os cálculos realizados nesta análise simplificada, o consumidor que optar por gerar sua própria energia poderá compreender melhor a importância de controlar seu consumo, maximizando os benefícios financeiros e garantindo um retorno satisfatório sobre seu investimento.

Além dos impactos econômico-financeiros, aos quais este estudo se dedica, é relevante considerar os efeitos ambientais, com destaque para as emissões de dióxido de carbono (CO₂). De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2024), o fator médio de emissão no sistema elétrico brasileiro entre os anos de 2011 e 2023 foi de aproximadamente 80,23 kgCO₂/MWh de energia gerada. Esse valor reflete a participação considerável de fontes fósseis na matriz elétrica nacional, cuja queima é responsável por emissões de gases do efeito estufa.

Nesse contexto, a adoção em larga escala de sistemas fotovoltaicos apresenta potencial para a redução dessas emissões, contribuindo positivamente para a sustentabilidade ambiental do setor energético. Contudo, observa-se que o efeito rebote pode comprometer esse objetivo, resultando em níveis de emissão superiores aos inicialmente projetados. Dessa forma, observa-se que os impactos do efeito rebote não se restringem às perdas econômicas, mas também se estendem ao campo ambiental, ao contrabalançar — ou até reverter — os benefícios esperados de investimentos voltados à redução das emissões de carbono.

AGRADECIMENTO

Os pesquisadores do Grupo de Estudos em Sistemas de Energia – GESE agradecem a Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, do Ministério da Educação, pelo apoio financeiro no projeto “MODELO DE AVALIAÇÃO DOS CONTRATOS DE DEMANDA DE ENERGIA (MACDE)”, TEDs 9537 e 16015, do IFSC Câmpus Florianópolis.

REFERÊNCIAS

AYDIN, Erdal *et al.* The rebound effect of solar panel adoption: Evidence from Dutch households. **Energy Economics**, [s. l.], v. 120, 23 mar. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988323001433>. Acesso em: 5 maio 2025.

BOCCARD, Nicolas; GAUTIER, Axel. Solar rebound: The unintended consequences of subsidies. **Energy Economics**, [s. l.], v. 100, 1 jun. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988321002401>. Acesso em: 5 maio 2025.

DELAPEDRA-SILVA, Vanderson; FERREIRA, Paula; CUNHA, Jorge; KIMURA, Herbert. **Methods for financial assessment of renewable energy projects: a review**. *Processes*, Basel, v. 10, n. 2, p. 184, 18 jan. 2022. DOI: 10.3390/pr10020184.

DENG, Gary; NEWTON, Peter. Assessing the impact of solar PV on domestic electricity consumption: Exploring the prospect of rebound effects. **Energy Policy**, [s. l.], v. 110, 30 ago. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421517305396>. Acesso em: 5 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2024.

GALVIN, Ray. Identifying possible drivers of rebound effects and reverse rebounds among households with rooftop photovoltaics. **Renewable Energy Focus**, [s. l.], v. 38, setembro 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008421000351>. Acesso em: 5 maio 2025.

GALVIN, Ray. Why German households won't cover their roofs in photovoltaic panels: And whether policy interventions, rebound effects and heat pumps might change their minds. **Renewable Energy Focus**, [s. l.], v. 42, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008422000540>. Acesso em: 5 maio 2025.

GALVIN, Ray *et al.* A health research interdisciplinary approach for energy studies: Confirming substantial rebound effects among solar photovoltaic households in Germany. **Energy Research & Social Science**, [s. l.], v. 86, 30 nov. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629621005168>. Acesso em: 5 maio 2025.

GASPARIN, Fabiano Perin. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KIM, Hyeonsoo; LIM, Ju Won. Predicting the economic feasibility of solar-based net-zero emission buildings (NZEBs) in the United States non-residential sector, **Journal of Cleaner Production**, Volume 470, 2024. 143272, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143272>.

JORDAN, D. C.; KURTZ, S. R. **Photovoltaic degradation rates — an analytical review**. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, n. 1, p. 12–29, 2013. DOI: 10.1002/pip.1182.

KIM, Jae D.; TREVENA, William. Measuring the rebound effect: A case study of residential photovoltaic systems in San Diego. **Utilities Policy**, [s. l.], v. 69, 16 jan. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178720301545>. Acesso em: 5 maio 2025.

KRATSCHMANN, Martina; DÜTSCHKE, Elisabeth. Selling the sun: A critical review of the sustainability of solar energy marketing and advertising in Germany. **Energy Research & Social Science**, [s. l.], v. 73, 5 fev. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629621000128>. Acesso em: 5 maio 2025.

LI, Xingzhi *et al.* Sustainability or continuous damage: A behavior study of prosumers' electricity consumption after installing household distributed energy resources. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 264, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620315183>. Acesso em: 5 maio 2025.

MEMTIMIN, Merhaba *et al.* Solar photovoltaics adoption and its impacts on energy consumption: evidence from Japanese households: evidence from Japanese households. **Renewable Energy Focus**, [s. l.], v. 53, 20 fev. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008425000122>. Acesso em: 5 maio 2025.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Fator de emissão de CO2 na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos**. Notícias, [S. l.], 22 fev. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos>. Acesso em: 5 maio 2025.

MOTLAGH, Omid *et al.* Analysis of household electricity consumption behaviours: Impact of domestic electricity generation. **Applied Mathematics and Computation**, [s. l.], v. 270, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009630031501084X>. Acesso em: 5 maio 2025.

MASLOW, A. H. *Motivation and personality*. New York: Harper & Row, 1954.

OLIVER, Matthew E. Tipping the scale: Why utility-scale solar avoids a solar rebound and what it means for U.S. solar policy. **The Electricity Journal**, [s. l.], v. 36, 13 maio 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619023000337>. Acesso em: 5 maio 2025.

ÖZSOY, Tudan. The “energy rebound effect” within the framework of environmental sustainability. **WIREs Energy and Environment**, [s. l.], v. 13, ed. 2, 2024. Disponível em: <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wene.517>. Acesso em: 19 maio 2025.

SORELL, Steve. Exploring Jevon's Paradox. In: HERRING, Horace; SORELL, Steve (ed.). **Energy Efficiency and Sustainable Consumption: The Rebound Effect**. [S. l.]: Palgrave Macmillian, 2009. cap. 7, p. 136-164. ISBN 978-1-349-35753-6.

TOROGHI, Shahaboddin H.; OLIVER, Matthew E. Framework for estimation of the direct rebound effect for residential photovoltaic systems. **Applied Energy**, [s. l.], v. 251, 25 maio 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919310657>. Acesso em: 5 maio 2025.

WANG, Shali *et al.* Traversing the Jevons Paradox: The dual role of residential photovoltaic systems in electricity conservation and increased consumption in an emerging economy. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 483, 20 nov. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624037132>. Acesso em: 5 maio 2025.

WANG, Zhaohua *et al.* Measurement of energy rebound effect in households: Evidence from residential electricity consumption in Beijing, China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115015622>. Acesso em: 5 maio 2025.